

Ana Clara Lazzari Franco

Calibração do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada

Exemplar de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial na obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dra. Nadia Bernardi Bonumá

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Franco, Ana Clara Lazzari Franco
Calibração do modelo SWAT com evapotranspiração
proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada /
Ana Clara Lazzari Franco Franco ; orientadora, Nadia
Bernardi Bonumá - Florianópolis, SC, 2017.
166 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. hidrologia. 3.
sensoriamento remoto. 4. calibração. 5. modelos
hidrológicos. I. Bonumá, Nadia Bernardi. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental. III. Título.



“Calibração do Modelo SWAT com Evapotranspiração Proveniente de Sensoriamento Remoto e Vazão Observada”

ANA CLARA LAZZARI FRANCO

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRA EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Prof.ª Nadia Bernardi Bonumá, Dr.ª
(Orientadora)

Prof. Davide Franco, Dr.

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffé, Dr.

Prof. Fernando Mainardi Fan, Dr.

Prof.ª Alexandra Rodrigues Finotti, Dr.ª

Prof.ª Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.ª
(Coordenadora)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
FEVEREIRO/2017

RESUMO

Recentemente o uso de modelos hidrológicos distribuídos e semi-distribuídos tem crescido, principalmente devido ao aumento na capacidade de processamento computacional e da disponibilidade de dados espacialmente distribuídos. Sua aplicação na gestão de recursos hídricos, como importante ferramenta de apoio nas tomadas de decisão, requer que as incertezas envolvidas nas estimativas modeladas sejam sempre quantificadas e comunicadas aos seus usuários. Apesar de indissociável, essas incertezas nem sempre são apresentadas nos estudos relacionados. A calibração de modelos hidrológicos utilizando variáveis observadas de maneira espacialmente distribuída, ou diferentes variáveis, pode ser capaz de reduzir as incertezas e contornar o problema da equifinalidade, pois menos conjuntos de parâmetros são capazes de satisfazer os critérios de calibração em todas as áreas simultaneamente. O presente trabalho procura investigar as hipóteses de que as calibrações *multi-site* e multi-variável são capazes de melhorar o desempenho e diminuir as incertezas da simulação de vazão pelo modelo SWAT. Foram avaliadas diferentes estratégias de calibração, integrando o uso de medições de vazão em múltiplas estações fluviométricas e estimativas de evapotranspiração provenientes de sensoriamento remoto. O modelo foi calibrado e validado na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, pelo SUFI-2, utilizando como função objetivo o índice KGE (Kling-Gupta Efficiency). A transferência de parâmetros entre diferentes escalas temporais também foi investigada. Para isto, os parâmetros foram calibrados em escala mensal e validados nas escalas mensal e diária. A evapotranspiração real foi obtida dos resultados da aplicação do METRIC a imagens MODIS por Uda (2016), que produziu estimativas mensais para toda a bacia do rio Iguaçu. Os resultados indicam que a adição de múltiplas estações fluviométricas e/ou da evapotranspiração nas estratégias de calibração leva à diminuição das incertezas na simulação da vazão. Todavia, as calibrações *multi-site* e multi-variável não levaram a melhorias significativas na performance do modelo na simulação da vazão. As validações em escala diária apresentaram resultados razoáveis em relação às incertezas (fator-p e fator-r) e à função objetivo ($KGE \geq 0,50$) para a simulação de vazão. Entretanto, o exutório e algumas subbacias não foram capazes de simular os picos de vazão satisfatoriamente. A transferência de parâmetros entre escalas temporais no SWAT depende de mais estudos.

Palavras-chave: SUFI-2, METRIC, transferência de parâmetros, incerteza, Kling-Gupta Efficiency - KGE.

ABSTRACT

Distributed hydrological models use has recently grown mostly due to the rising computational processing capacity and data availability. Application of hydrological models on water resources management, as important tool for decision making, requires the prediction uncertainty to be evaluated and clearly communicated to users. Despite intrinsic, uncertainty is not always clearly related. The use of multi-variable and/or multi-site calibration on hydrologic distributed models can help reduce equifinality problems, since less parameter sets can satisfy calibration criteria at all sites simultaneously. The present study investigate the hypothesis that multi-site and/or multi-variable calibration are able to improve model performance and reduce prediction uncertainty for streamflow predictions on SWAT model. Different calibration strategies were evaluated, integrating multiple streamflow measurements and evapotranspiration estimates from remote sensing products. SWAT model was calibrated and validated on Iguaçú river basin, using SUFI-2, with Kling-Gupta Efficiency (KGE) as objective function. The transference of parameters among different time steps was also investigated. For that, the model was calibrated only at monthly time step and validated on monthly and daily time steps. Actual evapotranspiration estimates were obtained from Uda (2016), which produced monthly evapotranspiration maps for the entire Iguaçú river basin. Results indicate that the use of multi-site or multi-variable calibration reduces streamflow prediction uncertainty, but no significant performance improvement was observed. Model daily validation results were satisfactory regarding uncertainty (r-factor and p-factor) and the objective function ($KGE \geq 0,50$) for the streamflow simulation. On the other hand, the main outlet and some subbasins were unable to correctly simulate flow peaks. Parameter transference between temporal scales for SWAT requires further investigation.

Key-words: SUFI-2, METRIC, temporal scale parameter transfer, uncertainty, Kling-Gupta Efficiency – KGE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Balanço de energia de superfície.....	34
Figura 3.2: Fluxograma representativo das possíveis trajetórias da água precipitada no SWAT.	38
Figura 3.3: Distribuição da demanda evaporativa entre as camadas de solo de acordo com o valor do coeficiente <i>ESCO</i> , considerando uma evaporação potencial de 100mm.	40
Figura 3.4: Fluxograma operacional do PCP_SWAT.	42
Figura 3.5: Exemplo de uma frente de Pareto tridimensional, onde ED é a distância Euclidiana entre o ponto ótimo e o ponto ideal. Fonte: Gupta et al., 2009.	45
Figura 4.1: Fluxograma metodológico.	51
Figura 4.2: Localização e relevo da bacia do rio Iguaçu.	53
Figura 4.3: Solos da bacia do rio Iguaçu.	55
Figura 4.4: Disposição das cenas Landsat 8 que abrangem a bacia do rio Iguaçu.	57
Figura 4.5: Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas.	58
Figura 4.6: Localização das estações fluviométricas.	58
Figura 4.7: Estratégias de calibração de acordo com as variáveis incluídas na função objetivo de cada iteração.	64
Figura 5.1: Uso do solo na bacia do rio Iguaçu.	67
Figura 5.2: Balanço hídrico médio do SWAT não calibrado na bacia do rio Iguaçu para o período de 2006 a 2009.....	68
Figura 5.3: Coeficientes de desempenho da vazão mensal simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.	72
Figura 5.4: Coeficientes de desempenho da vazão diária simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.....	73
Figura 5.5: Coeficientes de desempenho da vazão mensal simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação da precipitação por krigagem simples.....	78
Figura 5.6: Coeficientes de desempenho da vazão diária simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação da precipitação por krigagem simples. ...	79

Figura 5.7: Comparação dos coeficientes de desempenho com e sem interpolação dos dados de precipitação. Período de 2006 a 2009, escala mensal.	80
Figura 5.8: Comparação dos coeficientes de desempenho com e sem interpolação dos dados de precipitação. Período de 2006 a 2009, escala mensal.	81
Figura 5.9: Coeficientes de desempenho do modelo não calibrado, após interpolação da precipitação por krigagem simples, para simulação diária e mensal.	82
Figura 5.10: Evapotranspiração real média mensal estimada pelo SWAT e METRIC.	84
Figura 5.11: Precipitação média anual para o período 2006-2009.	85
Figura 5.12: Evapotranspiração média anual (METRIC e SWAT) e altitude da bacia do rio Iguaçu.	86
Figura 5.13: Sensibilidade relativa dos parâmetros, de acordo com a variável da função objetivo.	88
Figura 5.14: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação mensal para o período de 2006-2009.	93
Figura 5.15: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação mensal para o período de 2002-2005.	94
Figura 5.16: Hidrogramas mensais das melhores simulações de cada estratégia e dados observados, para as quatro estações selecionadas.	95
Figura 5.17: Curvas de permanência das vazões mensais simuladas e observadas, para o período de 2002-2009.	96
Figura 5.18: Curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas, para o período de 2002-2009.	101
Figura 5.19: Hidrogramas diários das melhores simulações de cada estratégia e dados observados, para as quatro estações selecionadas. Período de julho/2005 a junho/2006.	102
Figura 5.20: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação diária para o período de 2006-2009.	103
Figura 5.21: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação diária para o período de 2002-2005.	104

Figura 5.22: Índices de desempenho (KGE e NS) para a média e as quatro localidades selecionadas, para as simulações mensais e diárias.	105
Figura 5.23: Distribuição dos fatores p e r de todas as estações, por estratégia e período.	109
Figura 5.24: Curva de permanência das vazões diárias observadas e simuladas, para o período de 2002-2009, na estação Porto Santo Antônio.	110
Figura 5.25: Índice KGE para a última iteração da calibração (2006-2009, escala mensal), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	113
Figura 5.26: Índice PBIAS para a última iteração da calibração (2006-2009, escala mensal), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	114
Figura 5.27: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a última iteração da calibração (2006-2009, escala mensal), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	115
Figura 5.28: Índice KGE para a validação mensal (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	116
Figura 5.29: Índice PBIAS para a validação mensal (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	117
Figura 5.30: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a validação mensal (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	118
Figura 5.31: Índice KGE para a validação diária (2006-2009), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	119
Figura 5.32: Índice KGE para a validação diária (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	120
Figura 5.33: Índice PBIAS para a validação diária (2006-2009), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	121
Figura 5.34: Índice PBIAS para a validação diária (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	122
Figura 5.35: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a validação diária (2006-2009), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	123
Figura 5.36: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a validação diária (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.	124
Figura 5.37: Sensibilidade relativa dos parâmetros para a última iteração da calibração, para a estação São Bento em comparação ao exutório e à média de todas as estações.	126
Figura 5.38: Sensibilidade dos parâmetros na iteração final, em relação à todas as estações de vazão da bacia (KGE).	127

Figura 5.39: Valores normalizados dos intervalos finais calibrados, para cada parâmetro e estratégia..... 129

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Bandas Landsat 8. Traduzido de USGS.....	30
Tabela 3.2: Bandas do sensor MODIS. Traduzido de NASA. ...	31
Tabela 4.1: Imagens Landsat 8 utilizadas na elaboração do mapa de uso do solo.....	56
Tabela 4.2: Dados para entrada e calibração do modelo SWAT.....	59
Tabela 4.3: Classes de declividade e área correspondente na bacia.....	60
Tabela 4.4: Parâmetros considerados na análise de sensibilidade e respectivos intervalos e métodos de ajuste do valor.....	62
Tabela 4.5: Estações fluviométricas selecionadas para calibração e validação do modelo SWAT na bacia do rio Iguaçu.	66
Tabela 5.1: Distribuição dos usos identificados na bacia do rio Iguaçu.....	67
Tabela 5.2: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado, em escala mensal para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.....	70
Tabela 5.3: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado, em escala diária para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.....	71
Tabela 5.4: Erro médio (mm) de cada método de interpolação de precipitação diária disponível no PCP_SWAT.....	74
Tabela 5.5: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado com precipitação diária interpolada com krigagem simples, em escala mensal para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu.	76
Tabela 5.6: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado com precipitação diária interpolada com krigagem simples, em escala diária para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu.....	77
Tabela 5.7: Coeficientes de correlação de Pearson entre os indicadores de desempenho da vazão e a área de contribuição das bacias correspondentes.....	83
Tabela 5.8: Coeficiente de correlação de Pearson entre as estimativas de evapotranspiração real do SWAT e METRIC, a nível de subbacia.....	85

Tabela 5.9: Indicadores estatísticos para a melhor simulação de cada estratégia, em escala mensal, para os períodos de calibração (2006-2009) e validação (2002-2005).	92
Tabela 5.10: Indicadores estatísticos para a melhor simulação de cada estratégia, em escala diária, para os períodos de calibração (2006-2009) e validação (2002-2005).	100
Tabela 5.11: Indicadores de incertezas (fatores p e r) para a média e as quatro estações selecionadas, para as simulações mensais.	111
Tabela 5.12: Indicadores de incertezas (fatores p e r) para a média e as quatro estações selecionadas, para as simulações diárias.	112
Tabela 5.13: Intervalos finais de calibração normalizados.....	129
Tabela 5.14: Intervalos finais dos parâmetros calibrados de acordo com cada estratégia.	130

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i> - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CN	<i>Curve Number</i>
SWAT-CUP	<i>SWAT Calibration Uncertainty Procedure</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EOS	<i>Earth Observing System</i>
GLUE	<i>Generalized Likelihood Uncertainty Estimation</i>
HRU	<i>Hydrological Response Units</i>
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KGE	<i>Kling-Gupta Efficiency</i>
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
METRIC	<i>Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OLI	<i>Operational Land Image</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SCS	<i>Soil Conservation service</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

1.	Introdução	19
2.	Objetivos	25
2.1.	Objetivo geral.....	25
2.2.	Objetivos específicos	25
3.	Revisão bibliográfica.....	27
3.1.	Sensoriamento Remoto	27
3.2.	Landsat 8	28
3.3.	MODIS.....	29
3.4.	Evapotranspiração.....	32
3.5.	SEBAL e METRIC - Estimativas de fluxo de calor com sensoriamento remoto	33
3.6.	SWAT	35
3.7.	Interpolação dos dados de precipitação.....	41
3.8.	Calibração e validação de modelos hidrológicos	43
3.9.	Uso de produtos de sensoriamento remoto na calibração do SWAT	48
4.	Materiais e Métodos	51
4.1.	Área de Estudo	51
4.2.	Solos.....	53
4.3.	Uso e cobertura do solo.....	55
4.4.	Séries históricas de dados meteorológicos e hidrológicos .	57
4.5.	SWAT	58
4.6.	Calibração e validação	61
4.7.	Incertezas dos parâmetros	65
5.	Resultados	67
5.1.	Uso do solo.....	67
5.2.	Análise preliminar do SWAT não calibrado, na bacia do rio Iguaçu.....	68
5.3.	Interpolação espacial dos dados de precipitação	74
5.4.	Desempenho do modelo não calibrado após a interpolação espacial dos dados de precipitação.....	74
5.5.	Análise de sensibilidade relativa inicial	87
5.6.	Calibração e validação	88
6.	Conclusões e Recomendações.....	131
7.	Referências Bibliográficas	133
	Apêndice I – Estações Pluviométricas	143

Apêndice II – Estações Fluviométricas	146
Apêndice III – Estações Meteorológicas.....	148
Apêndice IV – Parâmetros	149
Apêndice V – Correlação entre os parâmetros calibrados, para o período de calibração (2006-2009), de acordo com a estratégia....	151
Apêndice VI – Valores para os fatores p e r de cada estação, para cada estratégia analisada.....	154
Apêndice VII – Hidrogramas mensais observados das estações fluviométricas e 95PPU de cada estratégia de calibração.	156

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, seguido pela expansão e intensificação das atividades agrícolas e industriais aumenta a pressão sobre os recursos hídricos. Modelos hidrológicos são ferramentas importantes na gestão destes recursos, permitindo estudar mudanças no uso do solo e impactos das mudanças climáticas, entre outros (DAGGUPATI et al., 2015). O aumento no poder de processamento computacional, crescimento na disponibilidade de dados e o progresso na compreensão teórica dos processos hidrológicos trouxe avanços para a modelagem hidrológica (LIU; GUPTA, 2007). Estes avanços são especialmente importantes na modelagem de grandes bacias, pois estas possuem maiores requisitos de dados de entrada e tempo de processamento, em modelos distribuídos ou semi-distribuídos.

Os modelos são representações aproximadas da realidade, e por isso, incapazes de considerar todas as variáveis e processos envolvidos. A simplificação física dos processos envolvidos, as estimativas de parâmetros desconhecidos e até mesmo os dados observados são fontes de incertezas nas predições do modelo (ABBOTT; REFSGAARD, 1996; BEVEN, 2012b). Wagener e Gupta (2005) ressaltam a necessidade da propagação e indicação das incertezas nas predições realizadas por um modelo, de modo a atribuir às estimativas um grau de confiança adequado. A calibração procura reduzir as incertezas decorrentes dos processos de estimativa e interpolação de parâmetros utilizados nos modelos, obtendo uma melhor parametrização do modelo para determinadas condições locais (ABBOTT; REFSGAARD, 1996; ARNOLD et al., 2012b).

A capacidade do modelo em realizar simulações suficientemente acuradas para situações distintas daquelas consideradas na sua calibração é demonstrada através da validação. A validação é geralmente realizada transferindo parâmetros de um intervalo de tempo para outro intervalo distinto, porém com a mesma escala temporal, seguindo a metodologia do *Split-sample test* de Klemeš (1986). Também proposto por Klemeš (1986) e comumente aplicado, o *Proxy-basin test*, consiste em transferir os parâmetros calibrados em uma bacia para outra similar. A transferência de parâmetros calibrados em uma escala temporal para outra escala temporal distinta, entretanto, não é um método comum de validação de modelos (DAGGUPATI et al., 2015).

O termo modelagem inversa (*inverse modelling – IM*) é utilizado para denotar o procedimento de calibração que busca fazer inferências

sobre os valores dos parâmetros do modelo a partir de observações das variáveis de saída, como uma alternativa à calibração manual (por tentativa e erro) e à medição direta dos parâmetros (ABBASPOUR, 2005; ABBASPOUR et al., 2007). Entretanto, uma variável de saída pode ser relativamente bem simulada por diversos valores de parâmetros e essa não-unicidade dos parâmetros (*parameter non-uniqueness*) é propriedade inerente da modelagem inversa (ABBASPOUR, 2005; ABBASPOUR et al., 2007). Conceito bastante similar e mais usual, porém, não restrito a uma estrutura de modelo, é o da equifinalidade: diferentes representações de modelos (conjuntos de parâmetros e estruturas de modelos) podem apresentar ajustes aceitáveis aos valores observados (BEVEN; BINLEY, 1992; BEVEN, 1993).

A consideração de variáveis observadas de maneira espacialmente distribuída, e de diferentes variáveis, pode reduzir o problema da equifinalidade, pois menos conjuntos de parâmetros são capazes de satisfazer os critérios de calibração em todas as áreas simultaneamente (BEVEN, 2006, 2012a; DAGGUPATI et al., 2015). Modelos hidrológicos geralmente são calibrados somente com dados de vazão observada no exutório da bacia modelada (CAO et al., 2006; HER; CHAUBEY, 2015). Em consequência disto, parte do ciclo hidrológico, especialmente a zona insaturada, pode permanecer não-calibrada (WANDERS et al., 2014).

Buscando a consideração de múltiplas variáveis, recentemente alguns estudos têm integrado estimativas de sensoriamento remoto na calibração de modelos hidrológicos (GITHUI; SELLE; THAYALAKUMARAN, 2012; IMMERZEEL; DROOGERS, 2008; MUTHUWATTA; BOOIJ; RIENTJES, 2009), tendo obtido melhoria no desempenho da simulação de vazão (KUNNATH-POOVAKKA et al., 2016; WANDERS et al., 2014; ZHANG et al., 2009) e diminuição das incertezas dos parâmetros (RAJIB; MERWADE; YU, 2016).

Em áreas remotas, a escassez de dados observados também constitui em obstáculo para calibração de modelos hidrológicos. Mesmo quando disponíveis, observações de vazão em bacias onde o regime hidrológico é governado por barragens podem ser inadequadas para determinação das características naturais da bacia (IMMERZEEL; DROOGERS, 2008). Produtos de sensoriamento remoto podem ser alternativa valiosa nestas situações (GETIRANA, 2010; KUNNATH-POOVAKKA et al., 2016).

Brutsaert (2005) indica que a evapotranspiração de todas as superfícies terrestres soma, em média, aproximadamente 60 a 65 % da precipitação total sobre as mesmas. A evapotranspiração também é um

fenômeno físico importante por fazer a ligação entre os balanços de massa e energia. A evapotranspiração, apesar de sua importância, ainda é de difícil quantificação em escalas espaço-temporais satisfatórias.

Devido a relevância da evapotranspiração no balanço hídrico de bacias, alguns trabalhos desenvolvidos nesta área procuram otimizar suas estimativas. Técnicas de sensoriamento remoto possibilitam o fornecimento de dados geográficos relevantes e variáveis em escalas espaço-temporais apropriadas para uso em modelos hidrológicos distribuídos (STISEN et al., 2008), podendo ser uma alternativa promissora para a estimativa da evapotranspiração por modelos hidrológicos. A evapotranspiração proveniente de produtos de sensoriamento remoto possui importante resolução espaço-temporal e pode ser utilizada para estimar parâmetros relacionados ao balanço de água do solo, como umidade do solo (ALLEN et al., 2007; GITHUI; SELLE; THAYALAKUMARAN, 2012; IMMERZEEL; DROOGERS, 2008).

Allen et al. (2002) e Allen; Tasumi e Trezza (2007) desenvolveram os algoritmos SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) e METRIC (*Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration*), para estimativas de evapotranspiração a partir de imagens de sensoriamento remoto. A possibilidade de estimar a evapotranspiração e o fluxo de calor à superfície a partir de imagens de satélite traz importante avanço no estudo da evapotranspiração. A evapotranspiração estimada pelos métodos SEBAL e METRIC possui boa confiabilidade na escala mensal. A acurácia global do SEBAL para escala diária em áreas da ordem de 100 ha é de +/- 15% (BASTIAANSEN et al., 2005). Ainda segundo Bastiaanssen et al. (2005) a acurácia típica do SEBAL para 1 dia é de 85% subindo para 95% em escala sazonal, e a acurácia anual para grandes bacias é de 96% em média.

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) tem sido extensivamente utilizado no Brasil e no mundo. Em escala global o SWAT já foi aplicado para análise de cenários de mudanças climáticas e de mudanças no uso do solo (AWAN; ISMAEEL, 2014; BRACMORT et al., 2006; SHESHUKOV et al., 2016); no estudo da erosão, produção de sedimentos e transporte de poluentes (BETRIE et al., 2011; OEURNG; SAUVAGE; SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011; YESUF et al., 2015); e na investigação do impacto do El Niño no regime hidrológico e produção de arroz em uma bacia indiana (BHUVANESWARI et al., 2013).

No Brasil o SWAT já foi empregado em estudos de avaliação de produção de sedimentos (SANTOS; SCUDELARI; LOURDES, 2013), simulação de mudanças climáticas (JUNIOR; MAUAD, 2015), impacto de práticas conservacionistas (STRAUCH et al., 2013) e de calibração hierárquica do modelo (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016). Em Bressiani et al. (2015) foram identificados 100 estudos utilizando o SWAT no Brasil entre os anos 1999 e 2015.

O SWAT é um modelo hidráulico-hidrológico baseado no equacionamento físico do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica. O modelo foi desenvolvido para prever impactos do uso do solo e aplicação de compostos químicos agrícolas nos recursos hídricos e produção de sedimentos (NEITSCH et al., 2011). A discretização espacial do SWAT é variável e pode ser ajustada pelo usuário. O modo padrão de simulação é semi-distribuído, definindo-se as HRUs (*Hydrologic Response Units*), que são as unidades de simulação dentro das subbacias.

Considerando a importância da evapotranspiração no balanço hídrico, e a crescente disponibilidade dos produtos de sensoriamento remoto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o uso de evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto na calibração do modelo hidrológico SWAT. A hipótese principal a ser investigada é de que as estratégias de calibração *multi-site* (múltiplas estações fluviométricas) e/ou multi-variável (evapotranspiração + vazão) do modelo SWAT são capazes de contornar o problema da não-unicidade dos parâmetros (*parameter non-uniqueness*), diminuindo, assim, as incertezas e melhorando o desempenho das estimativas de vazão do modelo. A calibração multi-variável foi comparada com a calibração convencional (utilizando somente os dados de vazão no exutório da bacia) e com a calibração *multi-site*, em relação ao desempenho e às incertezas das estimativas de vazão.

É objetivo deste estudo, também, explorar a validação do modelo através da transferência de parâmetros entre diferentes escalas temporais. Para isto, os parâmetros calibrados em escala mensal foram utilizados na validação da vazão em escala diária.

A bacia do rio Iguazu foi selecionada como área de estudo devido a sua importância socioeconômica e sua alta densidade de usinas hidrelétricas, que justificam a realização de estudos hidrológicos na bacia. A disponibilidade dos dados de evapotranspiração também foi limitante na seleção da área de estudo.

O desenvolvimento deste trabalho levou à produção de um artigo, a ser publicado no volume 22 da Revista Brasileira de Recursos

Hídricos (RBRH) sob o título “Calibração multi-variável do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada”.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral é avaliar o uso da evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto, em conjunto com observações de vazão, na calibração multi-variável do modelo SWAT. Analisando o desempenho e incertezas nas estimativas de vazão no exutório e interior da bacia do rio Iguaçu.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a influência da interpolação espacial dos dados de precipitação no desempenho do modelo SWAT;
- Analisar as estimativas de evapotranspiração do modelo SWAT para a bacia do rio Iguaçu;
- Avaliar as calibrações *multi-site* (múltiplas estações fluviométricas) e multi-variável (vazão + evapotranspiração) em relação ao desempenho e incertezas nas estimativas de vazão do exutório e interior da bacia;
- Avaliar a transferência de parâmetros entre diferentes escalas temporais, por meio da validação da vazão diária com parâmetros calibrados em escala mensal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sensoriamento Remoto

Novo (2008) define sensoriamento remoto como a utilização de sensores e equipamentos para processamento e transmissão de dados, colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e análise das interações entre radiação eletromagnética e as substâncias que compõem suas manifestações.

O sensoriamento remoto pode ser ativo ou passivo. Sensoriamento remoto ativo compreende sensores que emitem a radiação a ser refletida pela superfície de interesse e então registrada pelo sensor. O sensoriamento passivo mede a radiação naturalmente emitida ou refletida pela atmosfera, nuvens e solo. A radiação passível de medição por sensores a bordo de satélites é limitada pelas "janelas atmosféricas", isto é, os comprimentos de onda que são capazes de ultrapassar a atmosfera e atingir os sensores localizados na órbita terrestre (NOVO, 2008; SCHOWENGERDT, 2007).

O sensoriamento remoto pode ser utilizado na obtenção de informações precisas sobre as condições da superfície e processos de transferência solo-vegetação-atmosfera (BASTIAANSSEN; MOLDEN; MAKIN, 2000). O uso do solo, área irrigada, tipo de cultivo, temperatura, salinidade, evapotranspiração, entre outros, podem ser investigados por meio de sensoriamento remoto, auxiliando na construção de políticas, planejamento e pesquisa.

Quantificar o uso consuntivo de água sobre grandes áreas irrigadas é importante na gestão, planejamento e regulação dos direitos da água. Os avanços recentes na área de sensoriamento remoto possibilitam a estimativa acurada de evapotranspiração em grandes áreas de agricultura, bem como estimar a extração de água subterrânea em regiões não monitoradas (ALLEN et al., 2005).

A umidade do solo também pode ser estimada com auxílio de sensoriamento remoto. Petropoulos, Ireland e Barrett (2015) fazem uma revisão sobre os avanços do sensoriamento remoto aplicado à estimativas de umidade do solo nos últimos 20 anos, trazendo sua importância como elemento chave atual na abordagem de questões importantes, como segurança alimentar, planejamento sustentável e gestão da água.

A estimativa da evapotranspiração pode ser feita pelo fluxo de calor latente como residual do balanço de energia à superfície. Diversos algoritmos foram desenvolvidos no sentido de estimar os fluxos de calor à superfície da Terra através de sensoriamento remoto, dentre os quais se encontram o SEBAL e o METRIC. A principal desvantagem desses métodos são as imprecisões carregadas pelas estimativas dos fluxos de calor no solo, fluxo de calor sensível e saldo de radiação no cálculo do fluxo de calor latente (ALLEN et al., 2007a; BASTIAANSEN, 1998).

Imagens de satélite de diferentes projetos de observação da Terra são disponibilizados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e o USGS (*United States Geological Survey*) por meio de plataformas de distribuição on-line. O *EarthExplorer* [<https://earthexplorer.usgs.gov/>] é uma das plataformas de distribuição que disponibiliza produtos dos sensores MODIS e Landsat. Outras plataformas incluem o *Global Visualization Viewer – GloVis* [<http://glovis.usgs.gov/next/>], e o *LandsatLook Viewer* [<https://landsatlook.usgs.gov/>] e o centro de distribuição de dados do *Land Processes Distributed Active Archive Center – LP DAAC* [https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool]. A nível nacional, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) possui também uma plataforma de distribuição de imagens de satélite, onde podem ser obtidas imagens do projeto CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite* - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) entre outros.

3.2. Landsat 8

Landsat 8 (*Landsat Data Continuity Mission*) é o oitavo satélite do projeto Landsat, lançado em 11 de fevereiro de 2013. O primeiro satélite do projeto Landsat foi lançado em 1972. O satélite possui órbita heliossíncrona, frequência de revisitação de 16 dias e altitude nominal de 705 km. Landsat carrega dois sensores, o OLI (*Operational Land Image*) com nove bandas multiespectrais e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) que fornece duas bandas termais. Devido ao acesso livre, longo histórico de dados e alta resolução espacial dos produtos Landsat, sua utilização é bem difundida na comunidade científica (USGS, 2015).

Produtos dos sensores OLI e TIRS da missão Landsat foram aplicados para derivar a salinidade do golfo arábico (ZHAO; TEMIMI; GHEDIRA, 2017), avaliar a qualidade da água em lagos (ANDRZEJ URBANSKI et al., 2016) e para detecção de focos de incêndio (SCHROEDER et al., 2016).

3.3. MODIS

MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor a bordo dos satélites AQUA e TERRA, plataformas do projeto EOS (*Earth Observing System*) da NASA. O sensor adquire dados em 36 bandas espectrais diferentes, com comprimentos de onda entre 0,4 μm e 14,4 μm . As bandas 1 e 2 possuem resolução espacial de 250 m, as bandas 3 a 7 possuem 500 m de resolução espacial e as bandas 8 a 36 possuem resolução de 1 km. Os satélites Aqua e Terra possuem órbita heliossíncrona, polar, circular, altitude nominal de 705 km, e resolução temporal de 1 a 2 dias (PARKINSON; WARD; KING, 2006).

A hora de passagem do satélite TERRA pela linha do Equador é 10h30 e do satélite AQUA é 13h30. Produtos nomeados MOD referem-se a imageamentos feitos pelo satélite TERRA, produtos MYD advém de imageamentos do satélite AQUA, e produtos MCD são imagens compostas de ambos.

Produtos do sensor MODIS podem ser obtidos nas plataformas de distribuição em diferentes níveis de pré-processamento, abrangendo desde imagens brutas sem correção atmosférica até índices de vegetação. Todos os produtos e respectivos algoritmos de produção podem ser consultados através das plataformas de distribuição. A Tabela 3.1 e Tabela 3.2 apresentam as bandas dos sensores MODIS e Landsat 8 e seus usos principais.

Produtos do sensor MODIS já foram utilizados para estimar o balanço de radiação na região dos Himalayas (AMATYA et al., 2015), a produtividade agrícola nos pampas argentinos (HOLZMAN; RIVAS; PICCOLO, 2014), monitoramento da formação de gelo em rios (KRAATZ; KHANBILVARDI; ROMANOV, 2016), além de estimativas de clorofila, temperatura, sedimentos, e outros parâmetros, em corpos d'água (PALMER; KUTSER; HUNTER, 2015).

Tabela 3.1: Bandas Landsat 8. Traduzido de USGS.

Landsat 8 Operational Land Imager(OLI) e Thermal Infrared Sensor(TIRS)	Bandas	Comprimento de onda (Micrometros)	Resolução (Metros)
	Band 1 –aerossol costeiro	0,43 - 0,45	30
	Band 2 - Azul	0,45 - 0,51	30
	Band 3 - Verde	0,53 - 0,59	30
	Band 4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30
	Band 5 –Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 - 0,88	30
	Band 6 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 1	1,57 - 1,65	30
	Band 7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 2	2,11 - 2,29	30
	Band 8 - Pancromática	0,50 - 0,68	15
	Band 9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
	Band 10 –Infravermelho Termal (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100 * (30)
Band 11 - Infravermelho Termal(TIRS) 2	11,50 - 12,51	100 * (30)	

* bandas adquiridas com resolução de 100 m e reamostradas para 30 m.

Tabela 3.2: Bandas do sensor MODIS. Traduzido de NASA.

Uso Principal	Banda	Comprimento de onda ¹	Radiância espectral (W/m ² -µm-sr)
Terra/Nuvem/Aerossóis limites	1	620 - 670	21,8
	2	841 - 876	24,7
Terra/Nuvem/Aerossóis Propriedades	3	459 - 479	35,3
	4	545 - 565	29
	5	1230 - 1250	5,4
	6	1628 - 1652	7,3
	7	2105 - 2155	1
Cor do Oceano/ Fitoplâncton/ Biogeoquímica	8	405 - 420	44,9
	9	438 - 448	41,9
	10	483 - 493	32,1
	11	526 - 536	27,9
	12	546 - 556	21
	13	662 - 672	9,5
	14	673 - 683	8,7
	15	743 - 753	10,2
Vapor de água atmosférico	16	862 - 877	6,2
	17	890 - 920	10
	18	931 - 941	3,6
	19	915 - 965	15
Superfície/Nuvem Temperatura	20	3.660 - 3.840	0,45(300K)
	21	3.929 - 3.989	2,38(335K)
	22	3.929 - 3.989	0,67(300K)
	23	4.020 - 4.080	0,79(300K)
Temperatura atmosférica	24	4.433 - 4.498	0,17(250K)
	25	4.482 - 4.549	0,59(275K)
Nuvens Cirrus Vapor d'água	26	1.360 - 1.390	6,00
	27	6.535 - 6.895	1,16(240K)
	28	7.175 - 7.475	2,18(250K)
Propriedades das nuvens	29	8.400 - 8.700	9,58(300K)
Ozônio	30	9.580 - 9.880	3,69(250K)
Superfície/Nuvens Temperatura	31	10.780 - 11.280	9,55(300K)
	32	11.770 - 12.270	8,94(300K)
Altitude das nuvens	33	13.185 - 13.485	4,52(260K)
	34	13.485 - 13.785	3,76(250K)
	35	13.785 - 14.085	3,11(240K)
	36	14.085 - 14.385	2,08(220K)

¹Bandas 1 a 19 em nm; bandas 20 a 36 em µm.

3.4. Evapotranspiração

Evaporação e transpiração são processos de transformação da água no estado líquido para vapor e seu transporte para a atmosfera. Estes processos ocorrem simultaneamente dentro do sistema solo-vegetação-atmosfera sendo difícil sua distinção em solos com cobertura vegetal. Por isto, adota-se o termo evapotranspiração, que engloba a ocorrência simultânea de ambos processos. A razão entre evaporação e transpiração está relacionada com a área coberta por vegetação, o tipo e o estado de desenvolvimento da mesma. Em áreas com pouca cobertura vegetal a evaporação é o processo principal, porém, quando a cobertura vegetal é bem desenvolvida e cobre totalmente o solo, a transpiração é o processo dominante (ALLEN et al., 1998; BRUTSAERT, 1982).

A evapotranspiração de uma superfície de referência, com vegetação bem desenvolvida, sob determinadas condições climáticas e disponibilidade de água ilimitada, é chamada de evapotranspiração de referência (ET_{ref}). Em condições reais, no entanto, a disponibilidade de água pode ser limitada e a quantia de água efetivamente evapotranspirada é menor, sendo chamada de evapotranspiração real (ET_{real}) (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração pode ser estimada através de inúmeros métodos, desde medições locais diretas, através de equipamentos como lisímetros, até estimativas baseadas no cálculo do balanço hídrico. Baseado no princípio de conservação de massa, o método do balanço hídrico simplificado pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração de uma bacia hidrográfica. Para tal, supõe-se a bacia hidrográfica como um volume de controle onde podemos equacionar as entradas e saídas de água de maneira simplificada segundo a equação seguinte:

$$P - Q - E = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

onde P é precipitação média no intervalo de tempo considerado, Q é o escoamento superficial que deixa a bacia através do exutório, E é a taxa de evaporação e S é o volume de armazenamento subterrâneo, de modo que $\frac{dS}{dt}$ é a sua variação. O termo referente a variação de armazenamento subterrâneo pode ser desprezado quando se considera um longo período de tempo, tornando possível o cálculo da evapotranspiração.

A evapotranspiração também pode ser estimada equacionando o balanço de energia na superfície terrestre. A evaporação de água consome grandes quantias de energia sob a forma de calor sensível e latente, portanto, o processo é regido pela disponibilidade não somente

de água, mas também de energia. O processo de evapotranspiração faz a conexão entre os balanços de massa e energia no ambiente (ALLEN et al., 1998). Apesar de sua importância, ainda é de difícil quantificação em escalas espaço-temporais satisfatórias.

A nível global, Brutsaert (2005) indica que a evapotranspiração de todas as superfícies terrestres soma, em média, aproximadamente 60 a 65 % da precipitação total sobre as mesmas. Alguns trabalhos estimaram a evapotranspiração para diferentes formações vegetais, através de diferentes métodos. Em Kume et al. (2011) foi estimado um valor médio de evapotranspiração real de $1.323 \text{ mm ano}^{-1}$, correspondente a 51 % da precipitação média anual para um período de 10 anos, em florestas tropicais da Malásia. Os autores realizaram medições de fluxo de seiva para validar um modelo *big leaf* ("folha grande"), que considera o dossel como uma única folha gigante.

Cristiano et al. (2015) observaram valores médios de evapotranspiração real em áreas de floresta nativa de clima subtropical úmido no norte argentino, de $1.372 \text{ mm ano}^{-1}$ e $1.341 \text{ mm ano}^{-1}$, com imagens de evapotranspiração (MOD16) e medições de fluxo de seiva respectivamente, correspondendo a aproximadamente 68 % da precipitação média anual (2.000 mm).

Uda, Corseuil e Kobiyama (2014) estimaram a evapotranspiração real na bacia do alto rio Negro, região de floresta ombrófila mista no sul do Brasil, aplicando o SEBAL a imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Os autores estimaram valores médios de $1.496,5 \text{ mm ano}^{-1}$ ($4,1 \text{ mm dia}^{-1}$) para regiões de floresta ombrófila mista e $1.569,5 \text{ mm ano}^{-1}$ ($4,3 \text{ mm dia}^{-1}$) para reflorestamento de *Pinus sp.*

3.5. SEBAL e METRIC - Estimativas de fluxo de calor com sensoriamento remoto

O algoritmo SEBAL foi desenvolvido e validado por Bastiaanssen et al. (1998a, 1998b) a partir do qual o METRIC foi elaborado por Allen, Tasumi e Trezza (2007). Desde então, o SEBAL e o METRIC tem sido amplamente aplicados e validados no Brasil (MENDONÇA et al., 2012; SANTOS; SILVA; RAO, 2010; SILVA; SILVA; GOMES, 2010; TEIXEIRA et al., 2009) e no mundo (ALLEN et al., 2007; BASTIAANSEN, 2000; IMMERZEEL; GAUR; ZWART, 2008; TASUMI et al., 2005).

O SEBAL e o METRIC são modelos que realizam estimativas de evapotranspiração por meio do balanço energético à superfície, a partir

de dados meteorológicos e imagens de sensoriamento remoto. O SEBAL e o METRIC calculam as estimativas de evapotranspiração real instantânea para o momento de passagem do satélite como um “residual” do balanço de energia da superfície, calculado pela equação seguinte:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

em que, λET é o fluxo de calor latente ($W m^{-2}$), R_n é o saldo de radiação na superfície ($W m^{-2}$), G é o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível no ar ($W m^{-2}$) (ALLEN et al., 2002).

Balanço de energia para ET

ET é calculada como "residual" do balanço de energia

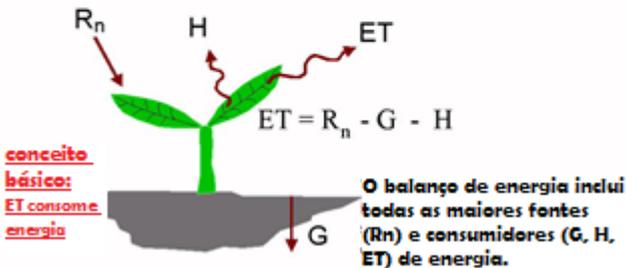


Figura 3.1: Balanço de energia de superfície.

Fonte: Traduzido de Allen et al. (2002).

No METRIC o saldo de radiação (R_n) é estimado a partir da refletância e temperatura de imagens de satélite; o fluxo de calor no solo (G) é estimado a partir do saldo de radiação (R_n) e índices de vegetação; por fim, o fluxo de calor sensível (H) é função da diferença da temperatura superficial, resistência aerodinâmica da superfície e velocidade do vento (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007). A metodologia de aplicação do modelo pode ser consultada para maiores detalhes em Allen; Tasumi e Trezza (2007).

SEBAL estima taxas de evapotranspiração com confiabilidade e precisão, para áreas planas de agricultura (ALLEN et al., 2002). Sua aplicação depende da definição de pixels quente e frio na imagem, para determinação do calor sensível. O pixel frio deve ser uma região com vegetação densa e bem hidratada, onde se presume que $\lambda ET = R_n - G$,

ou seja, toda a energia disponível é utilizada para evaporação da água e $H=0$. O pixel quente refere-se a uma área onde não haja água disponível para evapotranspiração ($\lambda ET = 0$), como por exemplo, solo exposto, e toda a energia é consumida aquecendo a superfície e o ar, ou seja, $H = Rn - G$ (ALLEN et al., 2002).

O METRIC utiliza os mesmos princípios básicos do SEBAL, estando sua maior diferença na determinação dos pixels quente e frio. Enquanto o SEBAL determina que o fluxo de calor latente no pixel quente é igual a zero, o METRIC realiza cálculos de balanço hídrico a fim de confirmar esta hipótese ou estabelecer o valor real de λET no pixel (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; TASUMI et al., 2005). O METRIC diferencia-se do SEBAL também pelo fato de considerar a topografia acidentada nas estimativas de fluxo de radiação, sendo mais indicado para regiões montanhosas.

A evapotranspiração estimada pelos métodos SEBAL e METRIC possui boa confiabilidade na escala mensal. A acurácia global do SEBAL para escala diária em áreas da ordem de 100 ha é de +/- 15% (BASTIAANSEN et al., 2005). Ainda segundo Bastiaanssen et al. (2005) a acurácia típica do SEBAL para 1 dia é de 85% subindo para 95% em escala sazonal, e a acurácia anual para grandes bacias é de 96% em média.

3.6. SWAT

Um modelo hidrológico é uma representação simplificada do sistema natural. Os modelos hidrológicos podem ser classificados quanto:

- à sua discretização espacial: concentrados (a bacia hidrográfica inteira é considerada como uma unidade), distribuídos (as variações espaciais de todas as variáveis e parâmetros são consideradas) ou semi-distribuídos;
- ao seu equacionamento: empírico ou *black box* (sem nenhuma consideração dos processos físicos, baseando-se somente nas entradas e saídas do modelo), conceitual (construído com base nos processos físicos, juntamente com equações semi-empíricas) ou fisicamente baseado (descreve o sistema natural com representações matemáticas básicas de fluxo de massa, momento e energia, e todos os parâmetros possuem significado físico, podendo ser medidos individualmente) (ABBOTT; REFSGAARD, 1996).

O SWAT é um modelo hidrológico fisicamente baseado e semi-distribuído. Foi desenvolvido em conjunto pelo Serviço de Pesquisa Agrícola dos Estados Unidos da América (*Agricultural Research Service-USDA-ARS*) e a universidade do Texas (*Texas A&M AgriLife Research*) para prever impactos do uso do solo e aplicação de compostos químicos agrícolas nos recursos hídricos e produção de sedimentos em longos períodos de tempo (NEITSCH et al., 2011).

O SWAT é um modelo de domínio público com código aberto e possui interfaces amigáveis disponíveis para alguns *softwares* de SIG (Sistema de Informações Geográficas), sendo estes atualmente o ArcGIS, MapWindow e QuantumGIS, disponíveis no site oficial do projeto [<http://swat.tamu.edu/>].

Originalmente, o SWAT foi desenvolvido com o objetivo de ser aplicado à bacias não monitoradas, portanto, dispensando o procedimento de calibração (ARNOLD et al., 1998). Para isto, a maior parte dos parâmetros pode ser estimada através do cruzamento dos dados de entrada com informações disponíveis no banco de dados do modelo (SRINIVASAN; ZHANG; ARNOLD, 2010). O desempenho do SWAT não calibrado em uma bacia hidrográfica do rio Mississippi foi avaliado e discutido por Srinivasan, Zhang e Arnold (2010).

Quanto à sua discretização, o modelo pode operar de maneira discretizada – por módulos-grid; ou semi-distribuída – agrupando as informações em HRUs (unidades de resposta hidrológica). As HRUs são áreas menores dentro das subbacias, previamente definidas pelo SWAT dentro da bacia de estudo, onde o uso do solo, tipo de solo e práticas de uso são únicas (NEITSCH et al., 2011).

Balanco Hídrico

O balanço hídrico é a base de todas as estimativas do modelo, sendo dividido em duas fases principais: a fase terrestre do ciclo hidrológico e a fase de propagação no canal.

Fase terrestre

A fase terrestre do ciclo hidrológico fundamenta-se na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_{t-1} + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3)$$

onde SW é o conteúdo de água no solo; t é o tempo em dias; R_{day} , Q_{surf} , E_a , w_{seep} e Q_{gw} são as quantias diárias de precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e escoamento de retorno, respectivamente, em mm dia⁻¹. O escoamento é estimado de maneira individual para cada HRU, sendo propagado para obtenção do escoamento total da bacia (NEITSCH et al., 2011).

O modelo requer informações locais específicas de clima, solo, topografia, vegetação e práticas de uso do solo. As variáveis climáticas requisitadas pelo SWAT incluem precipitação, temperatura mínima e máxima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Estas variáveis podem ser inseridas como dados de entrada ou geradas durante a simulação, pelo gerador climático do modelo. O gerador climático do SWAT pode ser construído pelo usuário a partir de séries históricas de dados meteorológicos. O gerador climático do modelo também é utilizado para preencher as possíveis falhas em dados de entrada (NEITSCH et al., 2011).

No SWAT, a água precipitada pode ser interceptada e permanecer no dossel da vegetação até sua evaporação ou escoamento, ou atingir diretamente a superfície do solo. A água que atinge a superfície do solo pode infiltrar ou escoar superficialmente e chegar rapidamente ao canal. A parcela infiltrada pode posteriormente ser evapotranspirada, recarregar o aquífero profundo ou alcançar algum corpo d'água superficial através de trajetos subterrâneos (NEITSCH et al., 2011). As possíveis trajetórias da água precipitada simuladas pelo SWAT estão sumarizadas na Figura 3.2.

A parcela da precipitação que contribui para o escoamento superficial pode ser estimada através do método do CN (*Curve Number*) desenvolvido pelo SCS (*Soil Conservation service*) ou do método Green & Ampt, como residual de infiltração. O pico do escoamento superficial é estimado com uma modificação do método racional, e o tempo de concentração da bacia é estimado utilizando a fórmula de Manning (NEITSCH et al., 2011).

Ao optar pelo método do CN, o volume de infiltração é estimado como a diferença entre a precipitação e o escoamento superficial. O método Green & Ampt modela a infiltração diretamente, no entanto, requer dados de precipitação subdiários (NEITSCH et al., 2011).

Ao optar pelo método do CN, a parcela de água interceptada pelo dossel da vegetação é considerada pelo CN determinado. Quando o método Green & Ampt de infiltração é usado, a interceptação deve ser estimada separadamente. O SWAT permite o cálculo da interceptação

pelo dossel como função do índice de área foliar - LAI (*Leaf Area Index*) (NEITSCH et al., 2011).

A evapotranspiração potencial pode ser informada diretamente para o modelo, a partir de séries de dados observados, ou calculada pelos dados meteorológicos. São oferecidas três metodologias de cálculo para a evapotranspiração potencial: Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), Priestley-Taylor (Priestley e Taylor, 1972), e Penman-Monteith (Monteith, 1965). O SWAT desconsidera o efeito de processos microclimáticos na evapotranspiração (NEITSCH et al., 2011).

A evapotranspiração real é estimada a partir da água armazenada no dossel e disponível no solo. A água armazenada no dossel é evaporada primeiramente. Caso a evapotranspiração potencial seja superior ao volume armazenado no dossel, a demanda evaporativa restante é distribuída entre solo e plantas (NEITSCH et al., 2011).

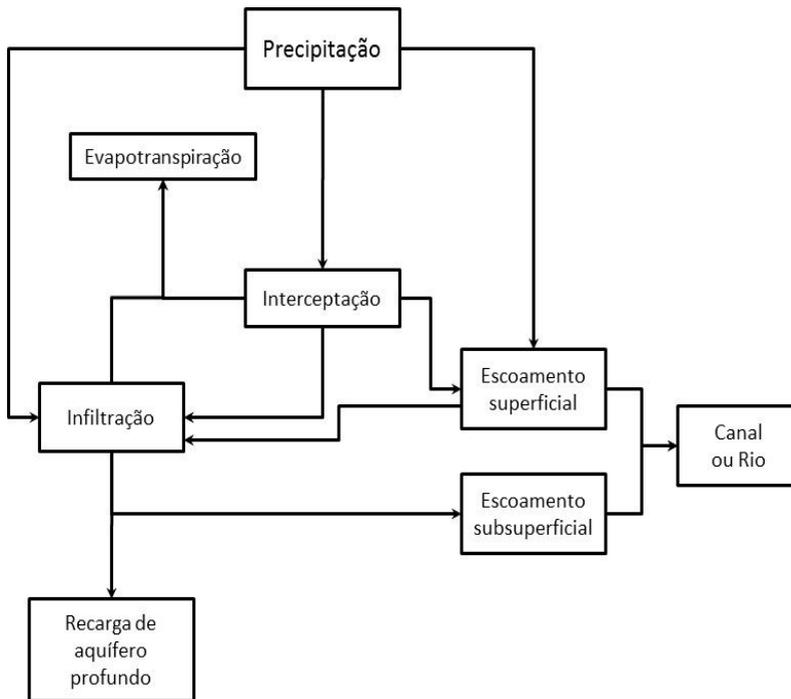


Figura 3.2: Fluxograma representativo das possíveis trajetórias da água precipitada no SWAT.

A estimativa do potencial de armazenamento de água pelo dossel da vegetação é variável de acordo com o índice de área foliar. O índice de área foliar é calculado diariamente, de acordo com o crescimento da planta. O volume potencialmente armazenado pelo dossel é calculado de acordo com a equação seguinte:

$$can_{day} = can_{max} \times \frac{LAI}{LAI_{max}} \quad (4)$$

onde can_{max} é o volume máximo potencialmente armazenado pelo dossel, can_{day} representa o volume potencial de um determinado dia, LAI_{max} é o valor máximo de índice de área foliar e LAI o índice de área foliar calculado para o dia. A precipitação de um determinado dia só atinge o solo após superar o volume potencial de armazenamento do dossel daquele dia (NEITSCH et al., 2011).

A evapotranspiração potencial do solo é função exponencial da evapotranspiração potencial diária e da cobertura do solo. A demanda evaporativa do solo é distribuída entre suas diferentes camadas. A demanda suprimida por cada camada de solo é controlada pelo coeficiente de compensação da evaporação do solo, $ESCO$, de acordo com a equação a seguir (NEITSCH et al., 2011):

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \cdot ESCO \quad (5)$$

onde, $E_{soil,ly}$ representa a demanda evaporativa para a camada y em mm de água, $E_{soil,zl}$ é a demanda no limite inferior da camada de solo e $E_{soil,zu}$ é a demanda do limite superior. A Figura 3.3 apresenta a relação entre o valor do coeficiente $ESCO$ e a distribuição da demanda evaporativa e profundidade do solo.

A transpiração das plantas é simulada como função linear da evapotranspiração potencial e do índice de área foliar. A demanda de transpiração das plantas é suprida de acordo com a água disponível no solo. Como as raízes das plantas se concentram nas camadas superiores do solo, estas suprem a maior parte da demanda de água. A distribuição da demanda de água entre as camadas de solo é controlada de maneira similar à evaporação direta da água do solo, através do fator de compensação $EPCO$, de acordo com a equação a seguir (NEITSCH et al., 2011):

$$w'_{up,ly} = w_{up,ly} - w_{demand} \cdot EPCO \quad (6)$$

onde, $w'_{up,ly}$ representa a demanda evaporativa ajustada para a camada y , em mm de água, $w_{up,ly}$ é a demanda evaporativa da camada y e

w_{demand} é a demanda evaporativa não suprida pelas camadas superiores.

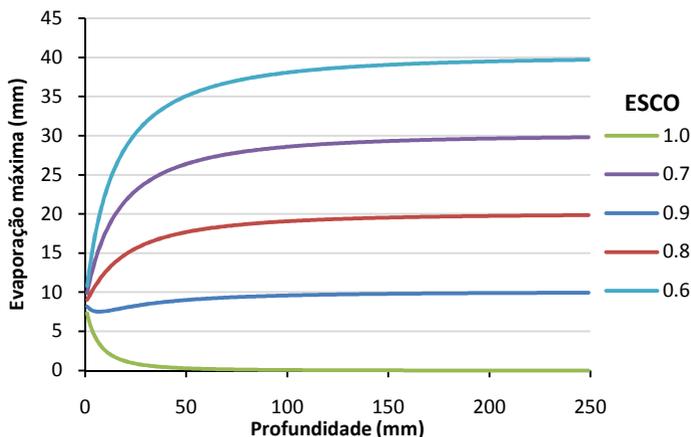


Figura 3.3: Distribuição da demanda evaporativa entre as camadas de solo de acordo com o valor do coeficiente $ESCO$, considerando uma evaporação potencial de 100mm.

O SWAT separa a água subterrânea em dois compartimentos: um aquífero raso e não confinado, que contribui para o escoamento de retorno nos canais dentro da bacia, e um aquífero profundo e confinado, que contribui para o escoamento de retorno fora da bacia (ARNOLD; ALLEN; BERNHARDT, 1993 apud NEITSCH et al., 2011).

Propagação no canal

A fase de propagação no canal modela o fluxo de massa e as transformações dos elementos químicos no canal e seu leito. A propagação no canal principal pode ser dividida em quatro componentes: água, sedimentos, nutrientes e compostos orgânicos. O SWAT possui dois métodos para cálculo da propagação da vazão: o método de Muskingum ou o método do coeficiente de armazenamento variável desenvolvido por Williams (1969) (NEITSCH et al., 2011).

Reservatórios

Reservatórios são resultados de represamentos situados no canal principal, recebem água de todas as subbacias a montante e não há distinção entre estruturas construídas ou naturais (NEITSCH et al.,

2011). A evaporação ocorrendo na superfície de um reservatório é calculada de acordo com:

$$V_{evap} = 10 \cdot \eta \cdot E_0 \cdot SA \quad (7)$$

onde, V_{evap} é o volume, em m^3 , evaporado durante o dia, η é um coeficiente de evaporação (0,6), E_0 é a evapotranspiração potencial diária em mm e SA é a área superficial do reservatório em hectares (NEITSCH et al., 2011).

A vazão de descarga do reservatório pode ser calculada por quatro métodos diferentes: descarga média diária observada, descarga média mensal observada, taxa média anual de descarga ou descarga controlada em função da vazão desejada (NEITSCH et al., 2011).

Crescimento de plantas

O SWAT possui um único modelo de crescimento da vegetação, baseado na teoria de unidades de calor. Segundo esta teoria, as plantas possuem requisitos de calor que podem ser quantificados e ligados ao tempo de maturação destas. As unidades de calor são contabilizadas de acordo com as temperaturas médias diárias, e as plantações crescem desde o plantio até a data de colheita, ou até que as unidades acumuladas de calor se igualem as unidades potenciais de calor para a planta (NEITSCH et al., 2011).

3.7. Interpolação dos dados de precipitação

Informação indispensável à modelagem hidrológica, a precipitação tem efeito acentuado na qualidade dos resultados. Frequentemente monitorada de forma pontual, sua interpolação espacial é etapa crítica, de modo que a aderência das metodologias aplicadas deve ser bem avaliada.

O modelo SWAT utiliza os valores de precipitação da estação mais próxima ao centróide de cada subbacia. Com a finalidade de reduzir as incertezas devidas às estimativas de precipitação, Zhang & Srinivasan, (2009) desenvolveram o PCP_SWAT, uma ferramenta auxiliar para interpolação de dados de precipitação por meio de técnicas geoestatísticas.

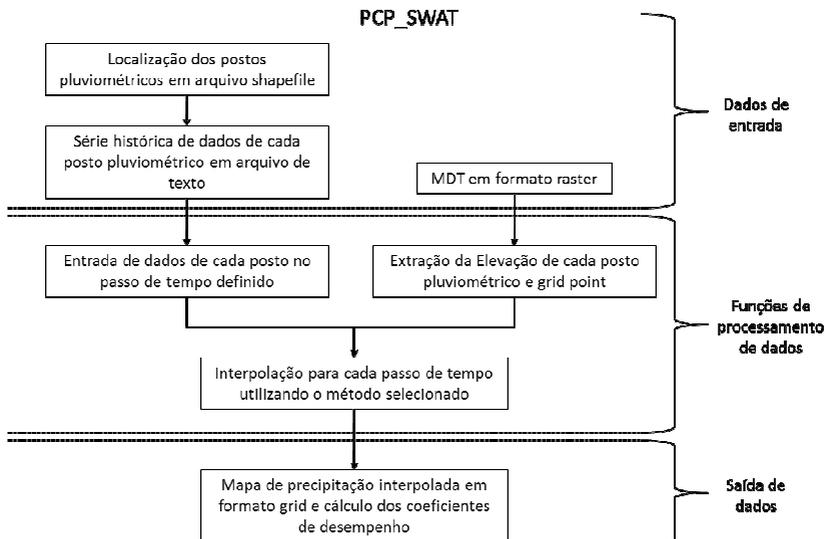


Figura 3.4: Fluxograma operacional do PCP_SWAT.

Fonte: adaptado de Zhang & Srinivasan, (2009).

O PCP_SWAT é uma extensão para o *software* ArcGIS, que apresenta seis diferentes métodos de interpolação de dados. As metodologias de interpolação disponíveis são: polígonos de Thiessen, inverso da potência da distância, krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem simples com médias locais variáveis e elevação como variável externa, krigagem com deriva externa. O uso de metodologias de krigagem requer a definição prévia do semivariograma adequado. O PCP_SWAT oferece quatro tipos de semivariogramas: esférico, circular, gaussiano e exponencial. Para o semivariograma selecionado, devem ser definidos os "*lag size*" e "*lag number*" de acordo com os dados a serem interpolados.

O PCP_SWAT gera estações pluviométricas no centróide de cada subbacia, previamente definidas pelo usuário no SWAT. Para cada estação criada, são gerados arquivos de texto com a série histórica de dados interpolada pelo método escolhido. Para avaliar a qualidade das interpolações dos diferentes métodos, são apresentados indicadores estatísticos para análise de desempenho, obtidos através da validação cruzada. A Figura 3.4 apresenta um fluxograma operacional do PCP_SWAT.

3.8. Calibração e validação de modelos hidrológicos

Arnold et al. (2012a) definem o processo de calibração como uma melhor parametrização do modelo para determinadas condições locais, reduzindo a incerteza de predição. A calibração de um modelo pode ser realizada alterando-se os valores dos parâmetros, selecionados com auxílio da análise de sensibilidade, e comparando as predições do modelo com os dados observados. A comparação dos dados observados e simulados pode ser feita através de medidas quantitativas do desempenho de ajuste do modelo, como as funções objetivo. Em modelos fisicamente baseados, como o SWAT, os valores associados aos parâmetros devem ser realistas.

Diferentes conjuntos de valores dos parâmetros podem levar a resultados similares, o que levou a construção da tese da equifinalidade: diferentes representações de modelos (conjuntos de parâmetros e estruturas de modelos) podem apresentar ajustes aceitáveis à valores observados (BEVEN; BINLEY, 1992; BEVEN, 1993). A consideração de variáveis observadas de maneira espacialmente distribuída pode reduzir o problema da equifinalidade, pois menos conjuntos de parâmetros são capazes de satisfazer os critérios de calibração em todas as áreas simultaneamente (BEVEN, 2006, 2012a; DAGGUPATI et al., 2015).

A análise de sensibilidade deve preceder a calibração, identificando os parâmetros aos quais o modelo responde mais sensivelmente. O objetivo primário da análise de sensibilidade é a redução do número de parâmetros a serem incluídos no processo de calibração, procurando otimizar o número de iterações necessárias. Usualmente se realizam dois tipos de análise de sensibilidade: local (um parâmetro de cada vez) e global (vários ou todos os parâmetros ao mesmo tempo) (ARNOLD et al., 2012b).

A calibração do SWAT pode ser feita manualmente ou com ajuda de ferramentas automatizadas, como o SWAT-CUP (*SWAT Calibration Uncertainty Procedure*). O SWAT-CUP foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar os usuários na calibração do modelo SWAT e possui cinco métodos diferentes de calibração: GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*); ParaSol (*Parameter Solution*); MCMC (*Markov chain Monte Carlo*); PSO (*Particle Swarm Optimization*) e SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fltting*) (ABBASPOUR, 2015).

A escolha da função objetivo utilizada na calibração do modelo influencia o resultado da calibração e o desempenho final do modelo calibrado. Oudin et al. (2006) abordam o impacto de diferentes funções

objetivo na calibração de um modelo chuva-vazão. Os autores sugerem o uso de funções objetivo que resultem em modelos adequados ao uso pretendido. Para tal, indicam o uso de funções que atribuam maior peso a vazões elevadas quando estas são o objeto de estudo, e o oposto para vazões de baixa magnitude.

Segundo Arnold et al. (2012), as funções objetivo mais utilizadas para calibração e validação do SWAT são os coeficientes de determinação (R^2 , equação 8) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS , equação 9). Outra função objetivo comumente empregada para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos em simular vazão é o percentual de tendência ($PBIAS$, equação 10). O coeficiente R^2 varia de 0 a 1, e o coeficiente de Nash-Sutcliffe assume valores entre $-\infty$ e 1, para ambos o valor 1 indica adequação perfeita. Para o $PBIAS$, o valor 0 indica a ausência de tendências de sub ou superestimativa (ARNOLD et al., 2012b; GREEN; VANGRIENSVEN, 2008).

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (8)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) * 100}{\sum O_i} \quad (10)$$

onde, n é o número de observações durante o período simulado, O_i e P_i são os valores observados e simulados em cada ponto i de comparação, e \bar{O} e \bar{P} são as médias aritméticas dos valores observados e simulados respectivamente (GREEN; VANGRIENSVEN, 2008).

Gupta et al. (2009) apresentaram uma função objetivo denominada KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) baseada na decomposição do coeficiente Nash-Sutcliffe e do Erro Quadrático Médio. A KGE pode ser decomposta em três termos diferentes que representam a correlação, a tendência do modelo ($BIAS$) e uma medida de variabilidade relativa entre os valores observados e simulados. O ponto ótimo é encontrado em termos de mínima distância euclidiana com relação ao ponto ideal, dentro de uma superfície de Pareto tridimensional, de acordo com:

$$KGE = 1 - ED \quad (11)$$

sendo,

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2}$$

$$\alpha = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

$$\beta = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$$

onde, ED é a distância euclidiana com o ponto ideal (Figura 3.5), r é o coeficiente de correlação linear, μ_o e μ_s as médias aritméticas dos valores observados e simulados, σ_o e σ_s o desvio padrão dos valores observados e simulados. Similar ao NS, os valores de KGE variam de $-\infty$ a 1, sendo 1 a adequação perfeita. No caso de múltiplas variáveis observadas, a função objetivo é ponderada segundo:

$$\text{função objetivo} = \sum_j w_j \cdot KGE_j \quad (12)$$

onde, w_j é o peso da variável j .

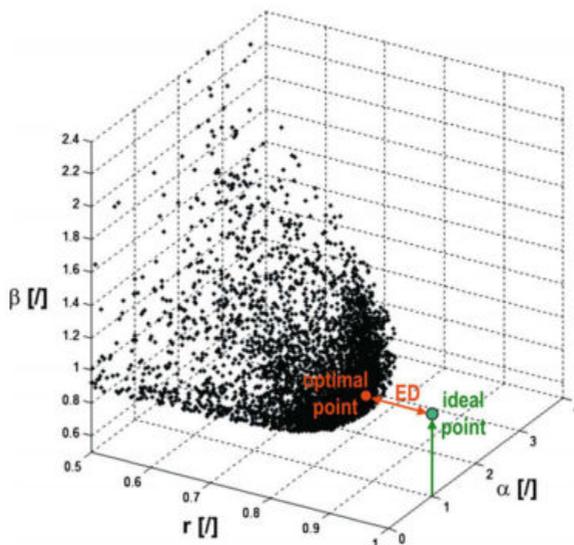


Figura 3.5: Exemplo de uma frente de Pareto tridimensional, onde ED é a distância Euclidiana entre o ponto ótimo e o ponto ideal. Fonte: Gupta et al., 2009.

Em geral, modelos hidrológicos são calibrados apenas com dados de vazão observados no exutório da bacia (CAO et al., 2006; HER; CHAUBEY, 2015). Wi et al. (2015) estudaram os impactos de diferentes estratégias de calibração na bacia hidrográfica do rio Kabul (67 370 km²), comparando o desempenho de modelos calibrados

somente com dados observados no exutório da bacia e modelos calibrados com dados de diversas estações fluviométricas distribuídas no interior da bacia. A calibração realizada somente com dados do exutório da bacia obteve resultados inferiores às calibrações com múltiplas estações fluviométricas. Os autores também observaram melhor desempenho do modelo quando calibrado simultaneamente com os dados das diferentes estações fluviométricas em face à calibração *stepwise*, onde os parâmetros são calibrados independentemente em cada subbacia e em ordem, a partir das subbacias de cabeceira em direção ao exutório da bacia. Daggupati et al. (2015) também indicam melhores resultados da calibração espacialmente distribuída quando comparada à calibração com valores observados somente no exutório de uma bacia com 28 330 km². Em contraste com estes estudos, Lerat et al. (2012) obteve melhoria limitada utilizando múltiplos pontos de vazão observada, quando comparado a calibração convencional, em bacias francesas com área de drenagem variando entre 102 e 9 390 km².

Um dos desafios na calibração de modelos hidrológicos é a necessidade de um grande número de iterações para que haja convergência para uma solução satisfatória, consumindo elevado tempo de processamento. Yang et al. (2008) compararam diferentes técnicas de calibração para o modelo SWAT aplicado a uma bacia na China. Os autores calibraram o modelo com 5 diferentes técnicas de calibração e análise de incertezas: *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), *Parameter Solution* (ParaSol), *Sequential Uncertainty Fitting algorithm* (SUFI-2), uma abordagem Bayesiana implementada através de Monte Carlo via Cadeias de Markov (*Markov chain Monte Carlo - MCMC*) e técnicas de amostragem por importância (*Importance Sampling -IS*). Os autores sugerem o uso de abordagens bayesianas com Monte Carlo via cadeias de Markov devido a sua sólida base teórica. Entretanto, SUFI-2 foi o algoritmo que atingiu desempenho satisfatório com o menor número de iterações.

O SUFI-2 é um algoritmo de calibração que opera com sucessivas iterações, com o mesmo número n de simulações cada. A cada nova iteração são reduzidos os intervalos dos parâmetros calibrados (*Range_Par*), sempre centrados no conjunto que produziu os melhores resultados na iteração anterior (*Best_Par*) (ABBASPOUR, 2015). O objetivo da calibração através do SUFI-2 é a definição de um intervalo de valores para cada parâmetro calibrado, e não a definição de um único conjunto ótimo de valores para cada parâmetro (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004). O número de iterações realizadas, e o número de simulações em cada iteração, são escolhidos

pelo usuário, bem como a função objetivo, utilizada para definição do conjunto dos valores ótimos dos parâmetros de cada iteração (*Best_Par*). O intervalo de parâmetros (*Range_Par*) é amostrado de acordo com o hipercubo latino, de maneira homogênea para as n simulações de cada iteração.

No SUFI-2, as incertezas são expressas como percentual de uma distribuição uniforme de probabilidade. A incerteza é indicada pelo intervalo de 95% de probabilidade (95PPU – 95 *Percent Probability Uncertainty*) calculada para os percentis de 2,5% e 97,5% da distribuição de probabilidade acumulada da variável de saída do modelo. Esta incerteza é apresentada como um "envelope" de soluções geradas pelo intervalo dos parâmetros, amostrado através do hipercubo latino, para as n simulações da iteração. Para quantificar o ajuste do intervalo dos parâmetros, são apresentadas duas estatísticas, o fator-p e o fator-r. O fator-p representa o percentual de observações (valores medidos) incluído no intervalo de 95% dos resultados da simulação. O fator-r é calculado como a razão entre a distância média dos percentis 2,5 e 97,5 e o desvio padrão médio dos dados observados, e representa a amplitude do envelope de simulações (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004).

A cada iteração, os valores dos fatores p e r são atualizados para o novo intervalo de valores dos parâmetros. A simulação perfeita apresentaria valor de 1,0 para o fator-p, ou seja, englobaria 100% dos dados observados, e zero para o fator-r. Deve-se procurar um equilíbrio entre os valores do fator-p e fator-r, de modo a encontrar um resultado que englobe grande parte dos dados observados, com a menor incerteza possível. Abbaspour (2015) recomenda $\text{fator-p} \geq 0,70$ e $\text{fator-r} \leq 1,5$ para a simulação de vazão.

A validação é o processo de executar o modelo calibrado para um intervalo de tempo ou uma subbacia diferente do utilizado na calibração e comparar suas estimativas com dados observados. O objetivo da validação é demonstrar a capacidade do modelo em realizar simulações suficientemente acuradas para períodos não calibrados (ARNOLD et al., 2012b).

Apresentado por Klemes (1986) o *split-sample test* é um método de validação que consiste na divisão igualitária da série de dados observados disponíveis, quando esta é suficientemente longa para representar as diferentes condições climáticas. Discussões sobre o tamanho de séries históricas de dados utilizadas para calibração de modelos hidrológicos, podem ser encontradas em Her e Chaubey (2015). Em casos em que a série observada é insuficiente para divisão

50/50, deve-se, então, dividi-la em duas parcelas diferentes, por exemplo 70/30 e 30/70, de modo que o período utilizado na calibração seja suficiente. Neste caso, a validação do modelo só é aceita se ambos os períodos de validação forem satisfatórios e similares.

A escolha dos parâmetros a serem calibrados deve ser precedida de uma análise de sensibilidade sempre que possível. No SUFI-2, a sensibilidade dos parâmetros é estimada através de uma análise de regressão múltipla. O valor de t-Stat é o coeficiente do parâmetro dividido por seu desvio padrão. O valor p testa a hipótese nula (H_0) de que o coeficiente é zero. Um baixo valor p ($<0,05$) indica que a hipótese nula (H_0) pode ser rejeitada, isto é, que o parâmetro pode ser considerado sensível com um intervalo de confiança de 95% (ABBASPOUR, 2015).

3.9. Uso de produtos de sensoriamento remoto na calibração do SWAT

Em áreas remotas, a limitação no número e distribuição espacial das estações fluviométricas disponíveis pode comprometer o processo de calibração. Mesmo quando disponíveis, observações de vazão em bacias onde o regime hidrológico é governado por barragens e reservatórios podem não ser capazes de refletir o comportamento natural da bacia e não são adequados para uso na calibração de modelos. Produtos de sensoriamento remoto podem ser alternativa valiosa nestas situações (GETIRANA, 2010; IMMERZEEL; DROOGERS, 2008; KUNNATH-POOVAKKA et al., 2016).

Recentemente, alguns estudos têm integrado as estimativas de fluxo de calor e evapotranspiração geradas pelos modelos SEBAL e METRIC a outros modelos hidrológicos. Immerzeel e Droogers (2008) calibraram o SWAT somente com evapotranspiração mensal, proveniente da aplicação do SEBAL a imagens MODIS, para uma bacia indiana com área de 45.678 km². Os autores avaliaram a calibração em relação à dados observados de vazão.

Na Austrália, Githui, Selle e Thayalakumaran (2012) utilizaram evapotranspiração, resultante da aplicação do SEBAL à imagens MODIS, e vazão, simultaneamente, na calibração do SWAT, com objetivo de estimar recarga de aquífero em uma bacia australiana irrigada (irrigação de 325 mm ano⁻¹) com área de drenagem de 600 km². Os autores relatam bom desempenho do modelo em simular a evapotranspiração, tendo obtido um R² de 0,87 e baixos valores de

PBIAS. Destaca-se que o referido estudo foi realizado em região de baixa pluviosidade e evapotranspiração (284 mm ano⁻¹ e 290 mm ano⁻¹).

Rajib, Merwade e Yu (2016) calibraram o SWAT com dados de umidade do solo obtidos de produtos de sensoriamento remoto e dados medidos em campo. Os autores utilizaram produtos AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System*) que estimam a umidade na camada superior (~1 cm) do solo. A estratégia utilizada pelos autores foi capaz de produzir melhores resultados no balanço hídrico simulado e reduzir a incerteza dos parâmetros calibrados quando são utilizadas ambas variáveis, em comparação à calibração convencional (somente vazão). Entretanto, mesmo após a calibração, os coeficientes de desempenho do modelo SWAT para umidade do solo apresentaram baixa correlação (R^2 não-calibrado = 0,13 R^2 calibrado = 0,35) sugerindo subestimação da umidade do solo pelo SWAT.

Wandres et al. (2014) calibraram o modelo hidrológico LISFLOOD com umidade do solo proveniente de sensoriamento remoto. A identificação de parâmetros relacionados aos processos superficiais foi possível utilizando somente a umidade do solo proveniente de sensoriamento remoto. Para a vazão, a calibração com ambos a umidade do solo e vazão observada apresentou uma redução de 10 a 30% do erro quadrático médio quando comparada com a calibração com somente dados de vazão.

Rientjes et al. (2013) calibraram o modelo HBV com dados de evapotranspiração real proveniente de sensoriamento remoto e dados de vazão observada no exutório da bacia. Os autores observaram que a calibração multi-variável apresentou redução nas incertezas dos parâmetros. No referido estudo, a calibração do modelo utilizando somente dados de evapotranspiração não foi capaz de apresentar bom desempenho para a simulação da vazão.

No Brasil, Sousa (2010) avaliou o uso de estimativas de fluxo de calor dos modelos SEBAL e METRIC no modelo SWAT, para uma subbacia do rio Lajeado no estado do Tocantins. O autor concluiu que assimilar as estimativas de fluxo de calor derivadas de sensoriamento remoto no modelo SWAT reduziu o PBIAS nas estimativas de vazão de 13% para 3% na vazão diária e de 9% para 7% na vazão mensal.

Rajib, Merwade e Yu (2016) e Rientjes et al. (2013) analisaram o impacto da calibração com dados de evapotranspiração nas incertezas dos parâmetros calibrados, porém, não foram encontrados na literatura trabalhos relatando o impacto da calibração com dados de evapotranspiração nas incertezas da predição de vazão dos modelos. Considerando a calibração multi-variável, também não foram

encontrados estudos reportando a transferência de parâmetros entre escalas temporais e/ou espaciais. O presente trabalho contribui com resultados das análises de incertezas na predição de vazão e avaliação da transferência de parâmetros entre escalas temporais, do modelo SWAT calibrado com evapotranspiração e vazão simultaneamente.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4.1 apresenta a sequência das atividades realizadas no presente trabalho.

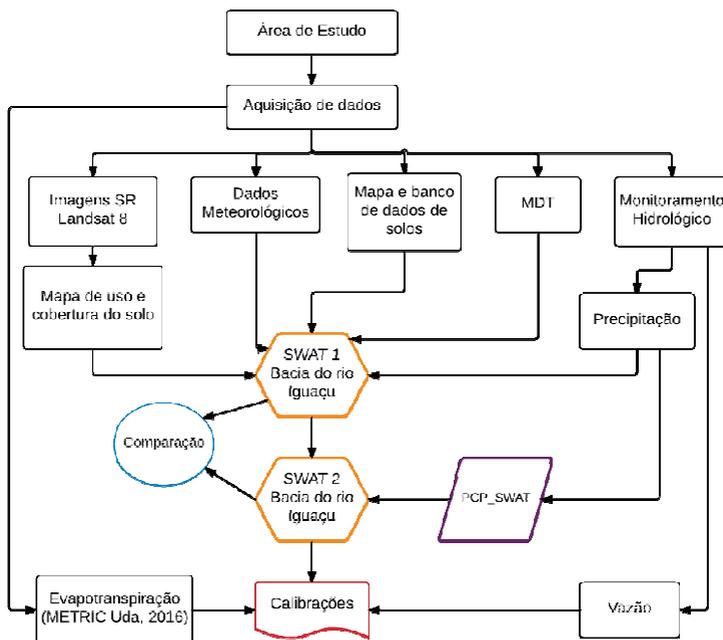


Figura 4.1: Fluxograma metodológico.

4.1. Área de Estudo

A bacia do rio Iguazu está localizada nos estados brasileiros Paraná e Santa Catarina, e parte na Argentina, a Figura 4.2 indica a localização da bacia. A bacia possui área total de 70.800 km² dos quais 68.410 km² situam-se no Brasil, sendo a maior parte (54.820 km²) no estado do Paraná. A área modelada compreende a região à jusante da estação fluviométrica de Porto Capanema (código 65987000) e abrange 63.884 km², totalmente em território brasileiro.

A altitude da bacia varia de 71 a 1.527 m, sendo os locais de maior altitude localizados na região do médio Iguazu. Segundo a classificação de Köppen, a maior parte da bacia é caracterizada por clima Cfb, ou seja, clima temperado, com temperatura média do mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), média no mês mais quente

abaixo de 22°C, verões frescos e sem estação seca definida. Na região do baixo Iguaçu, próximo ao exutório a bacia, o clima é Cfa, subtropical, diferente do Cfb por apresentar temperatura média do mês mais quente acima de 22°C e verões quentes (SIMEPAR, 2008).

Dentre as maiores cidades situadas na bacia, incluem-se Curitiba, Guarapuava e parte de Cascavel. Estima-se que a população total na bacia seja de 4.500.000 habitantes no Paraná e 1.000.000 na parte catarinense. Sua importância se dá pelo seu potencial de geração hidrelétrica e sua expressiva demanda de recursos hídricos para suprir principalmente o abastecimento urbano e setores industrial e agrícola. As indústrias predominantes são a automobilística, papel, frigoríficos e laticínios, e possui grande área ocupada pela agropecuária (SEMA, 2010). Destacam-se as usinas hidrelétricas de Salto Santiago (1.420 MW), Segredo (1.260 MW), Salto Caxias (1.240 MW) e Salto Osório (1.078 MW), que somam juntas 4.998 MW.

A região ainda é caracterizada por um grande número de Unidades de Conservação (SEMA, 2010). Localizado na bacia encontra-se o Parque Nacional do Iguaçu, reconhecido pela UNESCO como Patrimônio Natural da Humanidade. A bacia abriga também importantes corredores de biodiversidade, denominados “Iguaçu – Paraná”, no Sudoeste, e “Araucária” no Centro-Sul do Estado (SEMA, 2010).

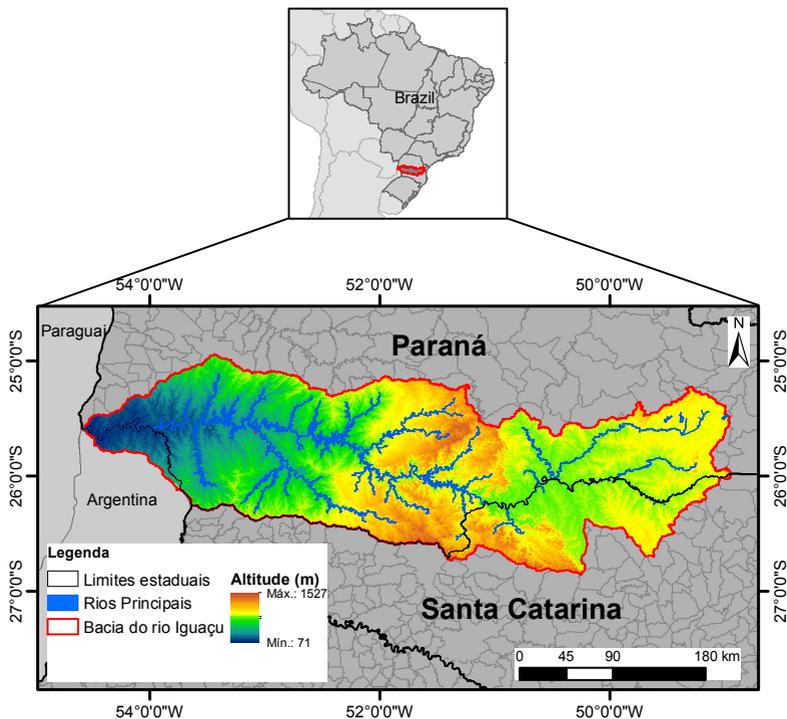


Figura 4.2: Localização e relevo da bacia do rio Iguçu.

4.2. Solos

O mapa de solos da área de estudo foi construído a partir dos mapas do Brasil (SANTOS et al., 2011), de Santa Catarina (FASOLO et al., 2004) e do Paraná (SANTOS et al., 2008), e pode ser visualizado na Figura 4.3. Os mapas foram obtidos em formato shapefile junto ao banco de dados da EMBRAPA (<<http://mapoteca.cnps.embrapa.br>>). Informações referentes a pontos de amostragem de cada tipo de solo presente na área de estudo foram selecionadas no banco de dados de solos da EMBRAPA (<<https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br>>), que reúne perfis de solo amostrados em todo o território brasileiro.

A seguir são descritos brevemente cada tipo de solo presente na região de estudo, de acordo com o definido no Sistema Brasileiro de Classificação de solos (EMBRAPA, 2006) e a parcela da bacia do rio Iguçu coberta por eles. Afloramentos rochosos, áreas urbanas e água somam 1,0% da área da bacia do rio Iguçu.

Argissolos (4,6%)

São solos constituídos por material mineral, com horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte A ou E. São de profundidade variável, de forte a imperfeitamente drenados, geralmente de cores avermelhadas ou amareladas, podendo ser também brunos ou acinzentados. Sua textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B.

Cambissolos (21,6%)

São solos formados por material mineral, com horizonte B incipiente. Possuem características muito variáveis devido a heterogeneidade do material de origem, relevo e condições climáticas. Podem ser de fortemente até imperfeitamente drenados, rasos ou profundos, com cores brunas até vermelho escuro.

Gleissolos (2,8%)

Solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei nos primeiros 150 cm de profundidade. Solos desta classe encontram-se periodicamente saturados, são mal ou muito mal drenados, e a água pode chegar a superfície por capilaridade. As cores destes solos refletem a gleiização, sendo acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, dependendo dos minerais predominantes. Ocasionalmente podem apresentar horizonte superficial com textura arenosa, sempre seguidos de horizontes glei de textura franco arenosa ou mais fina.

Latossolos (24,5%)

São os solos mais frequentes em território brasileiro, presentes em 31,61 % da área do país. Compostos por material mineral e apresentam avançado estágio de intemperização, muito evoluídos. Variam de fortemente a bem drenados, podem, por vezes, apresentar algum grau de gleiização e drenagem moderada ou até imperfeita. Normalmente profundos, em cores que variam de mais escuras no horizonte A para cores mais vivas no horizonte B.

Neossolos (29,3%)

São solos formados por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura, que não apresentam horizonte B diagnóstico. Não apresentam alterações expressivas em relação ao material de origem devido à baixa intensidade dos processos pedogenéticos, isto é, são pouco evoluídos.

Nitossolos (15,8%)

São solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico e textura argilosa ou muito argilosa. São profundos, bem drenados, e suas cores variam pouco, entre vermelho e bruno.

Organossolos (0,5%)

Solos pouco evoluídos constituídos por material orgânico, em diferentes estados de decomposição, podendo estar sobrepostos ou misturados a horizontes ou camadas minerais em maior ou menor proporção. Ocorrem em condições de drenagem restrita ou ambientes úmidos de altitudes elevadas. Geralmente ocorrem em áreas de várzeas, depressões e locais de nascentes, ou mesmo em locais saturados por água por poucos dias em períodos de chuva.

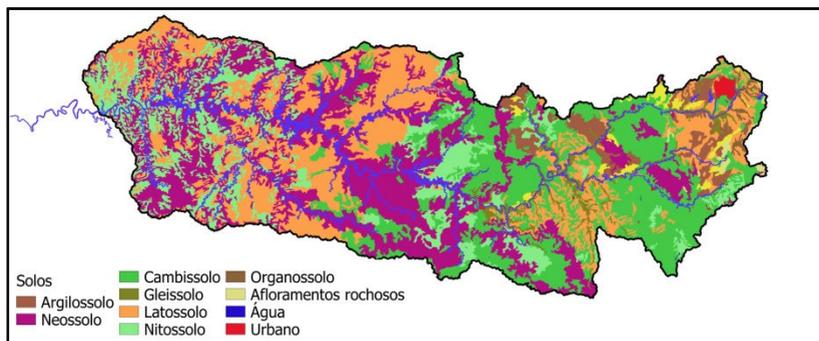


Figura 4.3: Solos da bacia do rio Iguaçu.

Fonte: EMBRAPA

4.3. Uso e cobertura do solo

Foram produzidos mapas de uso e cobertura do solo a partir de imagens Landsat 8 georreferenciadas, com resolução espacial de 30 metros, adquiridas para diferentes dias do ano de 2014, que compreendem toda a área da bacia. As datas das imagens utilizadas estão identificadas na Tabela 4.1, e a cobertura espacial de cada imagem pode ser visualizada na Figura 4.4. Os mapas de uso do solo foram utilizados como informações de entrada no modelo SWAT.

A elaboração dos mapas de uso do solo foi realizada com o *software* Spring 5.2.6, usando imagens Landsat 8, seguindo-se a metodologia de classificação supervisionada com segmentação por crescimento de regiões. Após a classificação inicial das imagens, todos

os mapas de uso gerados foram refinados com auxílio de imagens de satélite de alta resolução espacial (*Google Earth*), facilitando a identificação e confirmação dos usos. As classes definidas para a confecção dos mapas foram:

- Água;
- Reflorestamento (pinus e eucalipto);
- Mata nativa;
- Agricultura;
- Solo exposto;
- Área urbana;
- Pastagem;
- Campos nativos.

Após a confecção dos mapas, as classes de agricultura e solo exposto foram reclassificadas e identificadas como áreas genéricas de agricultura dentro do SWAT, pois ambas se referem a diferentes momentos de culturas agrícolas.

Tabela 4.1: Imagens Landsat 8 utilizadas na elaboração do mapa de uso do solo.

Cena	Imagem	Data
220-078	LC82200782014238	26-Ago-2014
221-078	LC82210782014037	06-Fev-2014
221-078	LC82210782014341	07-Dez-2014
222-077	LC82220772014236	24-Ago-2014
222-078	LC82220782014236	24-Ago-2014
223-077	LC82230772014195	14-Jul-2014
223-078	LC82230782014131	11-Mai-2014
224-078	LC82240782014218	06-Ago-2014

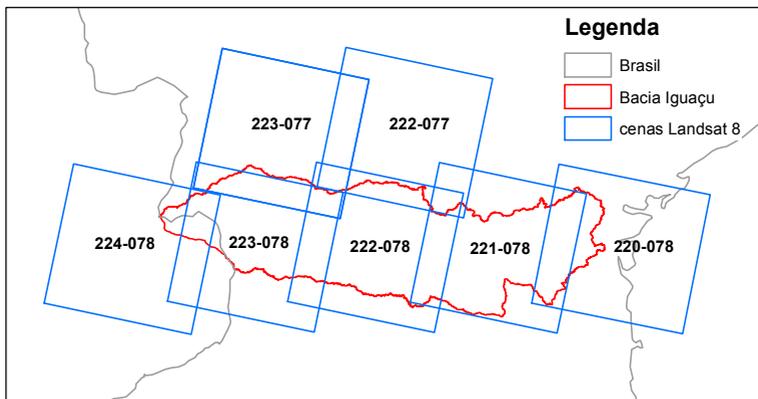


Figura 4.4: Disposição das cenas Landsat 8 que abrangem a bacia do rio Iguaçu.

4.4. Séries históricas de dados meteorológicos e hidrológicos

Os dados de precipitação utilizados são da rede de monitoramento da ANA (Agência Nacional de Águas) e foram obtidos junto a sua plataforma online Hidroweb. As séries históricas de vazão foram obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas do Instituto das Águas do Paraná e também na plataforma Hidroweb. As séries históricas de precipitação e vazão foram consistidas previamente ao seu uso. Foram reunidos dados meteorológicos referentes às estações operadas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná) e SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná) situadas na região. A Figura 4.5 apresenta a distribuição espacial das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas a serem utilizadas. Foram selecionadas 90 estações pluviométricas, 23 estações fluviométricas e 15 estações meteorológicas. As listagens das estações com seus respectivos códigos de identificação e localização geográfica se encontram nos Apêndices I, II e III.

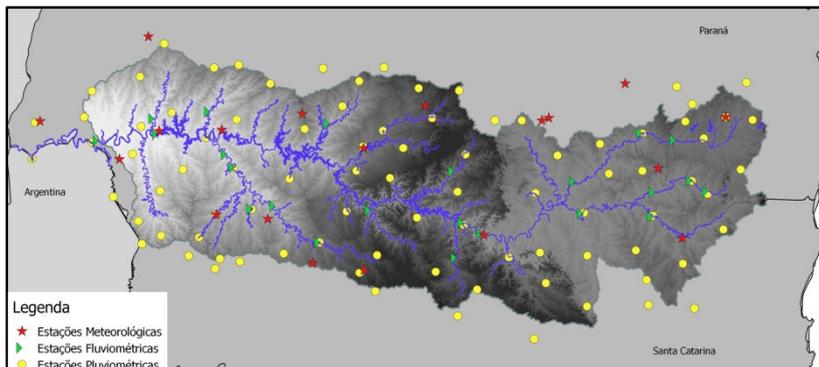


Figura 4.5: Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas.

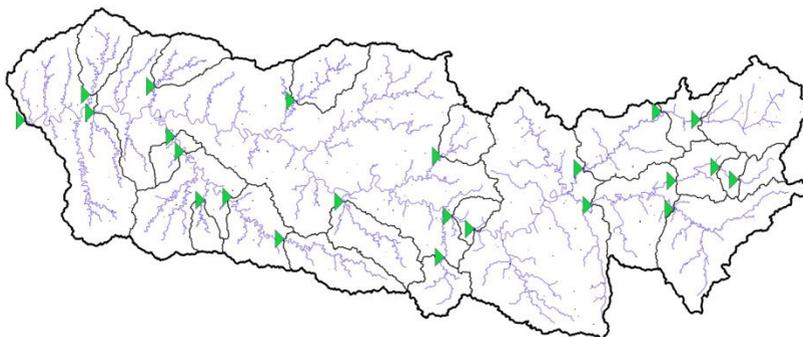


Figura 4.6: Localização das estações fluviométricas.

4.5. SWAT

O SWAT necessita como dados de entrada: dados meteorológicos, relevo do terreno, mapa de uso e ocupação do solo e mapa e base de dados dos tipos de solos. O SWAT foi implementado por meio de sua interface com o *software* QuatumGIS. Os dados meteorológicos utilizados no SWAT incluem: precipitação, temperatura mínima e máxima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar. O gerador climático foi construído para cada uma das estações meteorológicas utilizadas, a partir das séries históricas disponíveis, para preencher possíveis falhas.

Um período inicial de "aquecimento" do modelo (*warm up*) é indicado principalmente para simulações de períodos curtos (5 anos ou menos), a fim de estabelecer um equilíbrio das condições hidrológicas

iniciais do modelo. Geralmente, um ano de aquecimento é suficiente (ARNOLD et al., 2012a). No presente estudo, foram utilizados dois anos de aquecimento do modelo.

Séries históricas de precipitação diária foram consistidas e preenchidas todas as falhas entre os anos de 1990 e 2012, inclusive. As falhas foram preenchidas com a média ponderada pela distância das estações próximas.

A precipitação diária foi interpolada espacialmente com auxílio da ferramenta PCP_SWAT e os resultados da modelagem de vazão foram comparados com o método padrão (*default*) do SWAT, descrito no item 3.7. PCP_SWAT é uma ferramenta auxiliar para interpolação dos dados de precipitação para uso no SWAT e foram avaliadas as seis diferentes metodologias disponíveis: Polígonos de Thiessen; Inverso da potência da distância; Krigagem simples, com diferentes médias locais com elevação como variável externa; Krigagem ordinária; Krigagem com deriva externa e Krigagem simples. Para aplicação dos métodos de krigagem, utilizou-se o semivariograma esférico com um "*lag number*" de 12 e o "*lag size*" foi estabelecido como a distância média entre as estações pluviométricas. O método que apresentou o menor erro quadrático médio foi utilizado nas simulações sucessivas.

Tabela 4.2: Dados para entrada e calibração do modelo SWAT.

Variável de entrada (Input)	Fonte
Dados de precipitação	Hidroweb ANA
Mapas de solos	EMBRAPA
MDT	EMBRAPA
Dados meteorológicos	EPAGRI
	INMET
	IAPAR
	SIMEPAR
Mapas de uso do solo	Elaborado a partir de imagens Landsat 8
Variável observada (Calibração)	Fonte
Dados de vazão	Hidroweb ANA Águas Paraná
Evapotranspiração	METRIC em Uda (2016)

O modelo digital de terreno (DEM) utilizado foi obtido junto ao banco de dados online da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (<<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>) na resolução espacial de 90 metros. O DEM é resultado do processamento dos dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (MIRANDA, 2005).

Os mapas de uso e cobertura do solo foram elaborados segundo indicado no item 4.3, a partir de imagens Landsat 8 com resolução espacial de 30 metros, e reamostrados para 90 metros.

Os mapas de solos do Brasil, de Santa Catarina e do Paraná estão disponíveis no banco de dados do GeoPortal da EMBRAPA. Conforme descrito no item 4.3, o banco de dados de solos foi construído com informações de pontos de amostragem de solo nas proximidades da região de estudo que correspondessem aos tipos de solos da bacia. Informações de profundidade, granulometria, densidade, teor de carbono e de matéria orgânica de cada camada e a cor da camada superior foram reunidas para cada tipo de solo. O albedo dos solos foi identificado de acordo com a classificação de cores proposta por Post et al. (2000). A condutividade hidráulica (SOL_K) e a umidade do solo disponível para as plantas (SOL_AWC) foram estimadas a partir da composição granulométrica e equações de pedotransferência, para cada camada de solo. A Tabela 4.2 reúne as fontes dos dados utilizados neste trabalho, e a Figura 4.1 indica as etapas realizadas.

A área de contribuição mínima para geração de cursos d'água foi definida em 100 km², devido à extensão da bacia, gerando 365 subbacias. As classes de declividade foram consideradas de acordo com a EMBRAPA, estas classes e respectivas áreas estão sumarizadas na Tabela 4.3. Os limites para construção das HRUs foram definidos em 10% para uso do solo, tipo de solo e classe de declividade, resultando em 9.741 HRUs.

Tabela 4.3: Classes de declividade e área correspondente na bacia.

Classes de declividade (%)	Área da bacia (%)
0-3,0	16,87
3,0-8,0	22,56
8,0-13,0	22,43
13,0-20,0	16,83
20,0-45,0	18,86
45,0-75,0	2,22
>75,0	0,23

4.6. Calibração e validação

Na calibração e validação da bacia do rio Iguaçu, foram utilizados dados de 23 diferentes estações fluviométricas. A Figura 4.5 apresenta a localização das estações fluviométricas selecionadas e a Tabela 4.5 reúne suas principais características.

A evapotranspiração utilizada na calibração do modelo é resultado da aplicação do METRIC a imagens MODIS por Uda (2016). O trabalho produziu estimativas mensais de evapotranspiração real para os anos de 2006, 2007 e 2009. Os mapas de evapotranspiração produzidos possuem resolução espacial de 250 metros e cobrem toda a área da bacia do rio Iguaçu. Para calibração do SWAT neste trabalho, utilizou-se o valor médio dos pixels incluídos em cada uma das subbacias geradas na delimitação pelo SWAT.

Considerada a extensão espacial da bacia do rio Iguaçu, optou-se pela calibração com o algoritmo SUFI-2, pois os elevados requisitos de processamento impedem a aplicação de numerosas iterações, necessárias no uso de outros métodos. A metodologia de calibração do SUFI-2 permite a consideração do erro percentual de medição dos dados observados utilizados. Para o presente estudo, o valor sugerido em Abbaspour (2015) (10% para medição de vazão em condições típicas) foi utilizado para a vazão e também para a evapotranspiração. A função objetivo utilizada foi a KGE, adequada para a calibração de ambas a evapotranspiração e a vazão. Os fatores p e r foram utilizados na análise de incertezas das estratégias de calibração, de acordo com o indicado no item 3.8.

A análise de sensibilidade global foi realizada com os dados mensais, do período de calibração (2006-2009), dentro do SUFI-2. A análise de sensibilidade foi realizada com 23 parâmetros, indicados na Tabela 4.4, selecionados com base na literatura referente (BETRIE et al., 2011; GITHUI; SELLE; THAYALAKUMARAN, 2012; YANG; REICHERT; ABBASPOUR, 2007; ZHANG et al., 2015). O significado dos parâmetros utilizados nas calibrações (em negrito na tabela) pode ser consultado no Apêndice IV. A vazão média e evapotranspiração foram incluídas na função objetivo uma de cada vez, obtendo dois resultados de sensibilidade global. Os parâmetros aos quais a vazão e evapotranspiração se mostraram mais sensíveis foram selecionados para a calibração, restringindo-se a 12 parâmetros, devido às limitações de processamento computacional.

Tabela 4.4: Parâmetros considerados na análise de sensibilidade e respectivos intervalos e métodos de ajuste do valor.

	Método	Parâmetro	Mín.	Máx.
1	Relativo	CN2	-0,30	0,30
2	Relativo	SOL_AWC	-0,30	0,30
3	Substituir	SLSOIL	0	150
4	Substituir	ALPHA_BF	0	1
5	Substituir	GW_DELAY	0	500
6	Substituir	LAT_TTIME	0	180
7	Substituir	CH_K1	0	300
8	Substituir	CH_N1	0,01	0,5
9	Substituir	RCHRG_DP	0	1
10	Substituir	CANMX	0	10
11	Substituir	DEP_IMP	0	6000
12	Substituir	GWQMN	0	5000
13	Substituir	CH_K2	-0,01	500
14	Substituir	CH_N2	-0,01	0,3
15	Substituir	OV_N	0,01	1
16	Substituir	SLSUBBSN	10	150
17	Substituir	REVAPMN	0	1000
18	Substituir	GW_REVAP	0,02	0,2
19	Substituir	SURLAG	1	24
20	Substituir	EVLA1	0	10
21	Substituir	EPCO	0,6	1
22	Substituir	ESCO	0,6	1
23	Relativo	SOL_K	-0,25	0,25

Substituir: substitui o valor existente do parâmetro pelo novo valor; Relativo: multiplica o valor existente do parâmetro por (1+novo valor).

A bacia do rio Iguaçu foi calibrada e validada de acordo com o método do *Split-Sample Test*, proposto por Klemeš (1986). O período utilizado compreende os anos de 2002 a 2009, dividido de maneira igualitária para calibração (2006-2009) e validação (2002-2005). O período compreendido entre os anos 2006 e 2009 foi selecionado para calibração do modelo devido à disponibilidade de dados de

evapotranspiração (estimativas mensais para os anos 2006, 2007 e 2009). A evapotranspiração não foi validada.

O modelo foi calibrado em escala mensal, com os dados do período de 2006 a 2009, por diferentes estratégias (Figura 4.7). A primeira estratégia consiste no modo convencional de calibração, utilizando-se somente os dados de vazão do exutório da bacia nas duas iterações (E1). A segunda estratégia (E2) consiste na calibração com os dados do exutório da bacia na primeira iteração, e com os dados de evapotranspiração na segunda iteração (multi-variável). O modelo calibrado com dados de vazão de todas as estações disponíveis (exutório e estações à montante), nas duas iterações, corresponde à terceira estratégia de calibração analisada (E3 – *multi-site*). Na quarta estratégia (E4) o modelo foi calibrado com os dados de vazão de todas as estações na primeira iteração e com os dados de evapotranspiração na segunda iteração (multi-variável e *multi-site*). A quinta estratégia (E5) consiste na calibração com dados de evapotranspiração na primeira iteração e dados de vazão de todas as estações na segunda iteração (multi-variável e *multi-site*). Na sexta estratégia (E6) o modelo foi calibrado também com evapotranspiração na primeira iteração, porém, com dados de vazão somente do exutório da bacia na segunda iteração (multi-variável).

Os resultados das calibrações foram comparados também com o desempenho da simulação do modelo não calibrado (E0), na qual são utilizados os valores *default* do modelo para os parâmetros.

Nas iterações em que os dados de vazão de todas as estações foram incluídos na função objetivo, o valor de KGE refere-se à média aritmética das 23 estações fluviométricas. Nas iterações onde somente os dados de vazão do exutório da bacia foram utilizados, o valor da função objetivo é o da estação Porto Capanema (código 65987000).

O modelo foi calibrado somente em escala mensal, e a validação foi realizada nas escalas mensal e diária. A validação diária foi realizada separadamente para os períodos de 2002 a 2005 e 2006 a 2009 (utilizado na calibração).

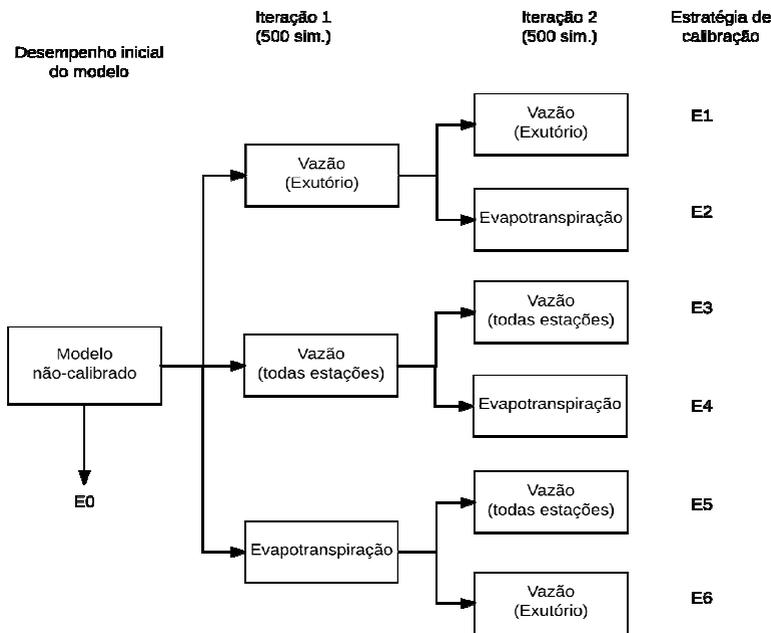


Figura 4.7: Estratégias de calibração de acordo com as variáveis incluídas na função objetivo de cada iteração.

Estações fluviométricas localizadas imediatamente à jusante de grandes barragens refletem a operação dos reservatórios nos seus registros diários de vazão, e não o comportamento natural do rio. No presente trabalho, não foram incluídas as operações dos reservatórios devido à ausência de dados, impedindo a correta simulação da vazão diária nestes trechos. Entre as estações fluviométricas selecionadas, as estações Usina Cavernoso, Salto Caxias se encontram nestas condições. A estação Usina Cavernoso (código 65855000) localiza-se na usina hidrelétrica de Cavernoso, que opera a fio d'água no rio Cavernoso. A estação fluviométrica de Salto Caxias (código 65975000) está localizada na hidrelétrica de Salto Caxias, e reflete a operação do reservatório nos registros de vazão diária. A estação de Porto Capanema (código 65987000), localizada no exutório da área modelada, se encontra a 88 km à jusante da hidrelétrica de Salto Caxias, porém, o comportamento da vazão diária registrada na estação fluviométrica ainda é influenciado pela operação do reservatório da hidrelétrica. Para estas estações os índices KGE diários, bem como o coeficiente de Nash-Sutcliffe para

vazões diárias, não refletem adequadamente o desempenho da simulação na bacia. Nestes casos, o desempenho da simulação de vazão pode ser avaliado através dos valores de PBIAS, pois, a longo prazo, o volume simulado deve igualar o observado.

4.7. Incertezas dos parâmetros

Para comparar as incertezas relacionadas a cada um dos parâmetros e para cada uma das diferentes estratégias, os intervalos finais calibrados foram normalizados. Para cada estratégia, os valores dos limites superior e inferior dos intervalos finais dos parâmetros calibrados (última iteração) foram normalizados em relação aos intervalos iniciais, segundo a equação:

$$P_N = 100 \times \left(\frac{P - LB}{UB - LB} \right) \quad (13)$$

onde P_N é o valor normalizado do parâmetro, P é o limite final (calibrado) do parâmetro (superior ou inferior), UB e LB são os limites superior e inferior do intervalo inicial de calibração. Abordagem similar, porém, considerando somente os valores de parâmetros que resultam em simulações aceitáveis, foi adotada em trabalhos similares na literatura da área (KUMAR; MERWADE, 2009; RAJIB; MERWADE, 2016; RAJIB; MERWADE; YU, 2016).

As estratégias de calibração foram comparadas entre si através dos intervalos resultantes de cada parâmetro normalizado, por meio da equação:

$$I = P_{N,Ui} - P_{N,Li} \quad (14)$$

onde, $P_{N,Ui}$ é o valor normalizado do limite superior do parâmetro i , $P_{N,Li}$ é o valor normalizado do limite inferior do parâmetro i , I é o intervalo normalizado do parâmetro.

Tabela 4.5: Estações fluviométricas selecionadas para calibração e validação do modelo SWAT na bacia do rio Iguaçu.

Código	Estação	Rio	Área de contribuição (km²)
65945000	PONTE DO VITORINO	VITORINO	495
65135000	RIO DA VARZEA	DA VARZEA	605
65136550	QUITANDINHA	DA VARZEA	941
65764000	MADEIREIRA GAVAZZONI	DA AREIA	976
65370000	JANGADA	JANGADA	1014
65970000	PORTO SANTO ANTONIO	GUARANI	1084
65979000	SAO SEBASTIAO	ANDRADA	1314
65855000	USINA CAVERNOSO	CAVERNOSO	1492
65775900	SOLAIS NOVO	IRATIM	1654
65925000	SALTO CLAUDELINO	CHOPIM	1655
65155000	SAO BENTO	DA VARZEA	2006
65028000	BALSA NOVA	IGUACU	2745
65100000	RIO NEGRO	NEGRO	3292
65927000	PORTO PALMEIRINHA	CHOPIM	3340
65035000	PORTO AMAZONAS	IGUACU	3625
65060000	SAO MATEUS DO SUL	IGUACU	6035
65960000	AGUAS DO VERE	CHOPIM	6692
65962000	FLOR DA SERRA	CHOPIM	7237
65175000	DIVISA	NEGRO	8050
65310000	UNIÃO DA VITÓRIA	IGUACU	24209
65365800	PORTO VITORIA	IGUACU	24735
65975000	SALTO CAXIAS	IGUACU	57060
65987000	PORTO CAPANEMA	IGUACU	63884

5. RESULTADOS

5.1. Uso do solo

Áreas de mata nativa compreendem metade (49,8 %) da porção modelada da bacia do rio Iguaçu, seguidas pela área ocupada por cultivos agrícolas (30,3 %). As áreas de mata nativa se concentram no médio e baixo Iguaçu. O reflorestamento ocupa 6,8 % da bacia, se concentra no alto e médio Iguaçu e abastece indústrias moveleiras e, principalmente, de celulose. Áreas de pastagem e cultivos agrícolas fomentam a intensa atividade agropecuária, e destacam-se as culturas de soja e trigo. A distribuição espacial dos usos do solo da bacia pode ser visualizada na Figura 5.1, e a contribuição de cada uso pode ser verificada na Tabela 5.1.

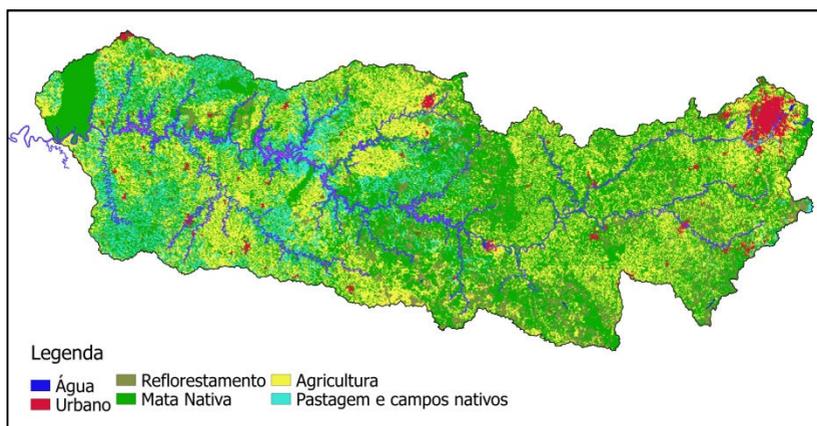


Figura 5.1: Uso do solo na bacia do rio Iguaçu.

Tabela 5.1: Distribuição dos usos identificados na bacia do rio Iguaçu.

Classe	Área	
	km ²	%
Água	913,3	1,4
Urbano	1.439,1	2,2
Reflorestamento	4.370,8	6,8
Mata Nativa	31.899,2	49,8
Agricultura	19.353,1	30,3
Pastagem e Campos Nativos	5.908,3	9,5

5.2. Análise preliminar do SWAT não calibrado, na bacia do rio Iguaçú

O período simulado para a calibração compreende os anos de 2004 a 2009, sendo os 2 primeiros anos de aquecimento do modelo. Os resultados prévios à calibração do modelo foram satisfatórios em escala mensal para grande parte da área da bacia. Entretanto, as estimativas em escala diária foram insatisfatórias para a maioria das subbacias, reforçando a necessidade de calibração do modelo. Os coeficientes de desempenho das diferentes estações fluviométricas da bacia estão indicados na Figura 5.3 e Figura 5.4 e sumarizados em escala mensal na Tabela 5.2 e em escala diária na Tabela 5.3.

Análises preliminares do balanço hídrico resultante da simulação inicial do SWAT não calibrado para a bacia do rio Iguaçú revelam uma tendência em subestimar a evapotranspiração real (674 mm ano^{-1}) em relação ao indicado pelo METRIC ($1.044 \text{ mm ano}^{-1}$) e superestimar a vazão (912 mm ano^{-1}) em comparação à média observada (702 mm ano^{-1}). Ademais, o SWAT estima recarga positiva do aquífero em 29 mm para o período. O balanço hídrico médio anual do período simulado pode ser observado na Figura 5.2.

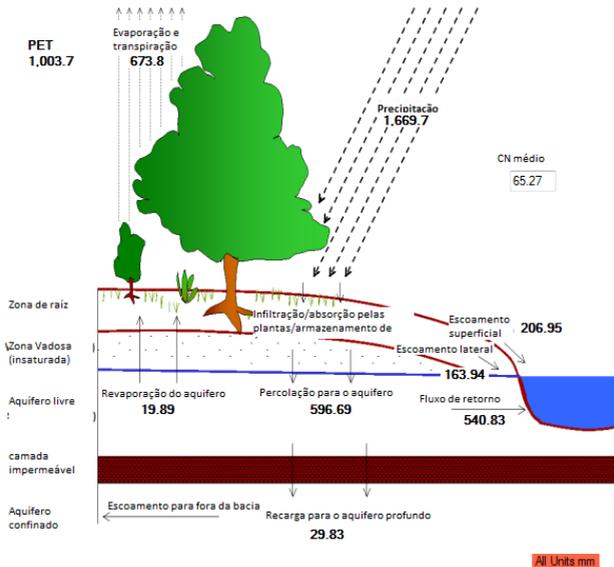


Figura 5.2: Balanço hídrico médio do SWAT não calibrado na bacia do rio Iguaçú para o período de 2006 a 2009.

Em escala mensal, São Bento (código: 65155000) é a única estação apresentando valor negativo de KGE. Para o modelo não calibrado, todas as estações apresentam valores negativos de PBIAS, variando de -7,7% a -91,5%, o que sugere superestimativa de vazões para todas as subbacias analisadas. Elevados valores absolutos de PBIAS são observados em algumas estações, entre elas: São Bento, código 6515500 (PBIAS=-91,5%) e Madeireira Gavazzoni, código 65764000 (PBIAS=-77,3%).

Tabela 5.2: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado, em escala mensal para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.

Estação	R ²	Nash	PBIAS	KGE	\bar{S} (m ³ /s)	\bar{O}	Área (km ²)
Balsa Nova	0,74	0,43	-7,7	0,57	60	56	2745
Porto Amazonas	0,79	0,08	-32,1	0,39	87	66	3625
São Mateus do Sul	0,74	0,22	-38,8	0,51	155	111	6035
Rio Negro	0,72	0,3	-37,2	0,53	82	60	3292
Rio da Varzea	0,7	0,24	-23,6	0,52	15	12	605
Quitandinha	0,72	-1,08	-58	0,08	26	16	941
São Bento	0,71	-2,59	-91,5	-0,28	58	30	2006
Divisa	0,67	-0,63	-71	0,15	216	126	8050
União da Vitória	0,72	0,07	-56,9	0,39	664	423	24209
Porto Vitória	0,71	0,47	-36,6	0,6	679	497	24735
Jangada	0,75	0,33	-46,7	0,51	38	26	1014
Madeira Gavazzoni	0,65	-0,66	-77,3	0,11	39	22	976
Solais Novo	0,83	0,13	-64,5	0,35	68	41	1654
Usina Cavernoso	0,8	0,38	-56,8	0,42	48	31	1492
Salto Claudelino	0,82	0,7	-27,2	0,66	67	53	1655
Porto Palmeirinha	0,85	0,74	-27,4	0,66	120	94	3340
Ponte do Vitorino	0,74	0,63	-26,9	0,69	15	12	495
Águas do Vere	0,85	0,74	-28,9	0,66	225	174	6692
Flor da Serra	0,86	0,79	-20,3	0,74	244	202	7237
Porto Santo Antônio	0,71	0,14	-75,4	0,23	40	23	1084
Salto Caxias	0,47	0,28	-28,6	0,56	1756	1366	57060
São Sebastião	0,3	0,25	-15,3	0,44	36	31	1314
Porto Capanema	0,4	0,02	-32,4	0,51	1903	1438	63884

Área = Área de drenagem da estação fluviométrica referente; R² = coeficiente de determinação; Nash = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

Tabela 5.3: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado, em escala diária para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.

Estação	R ²	Nash	PBIAS	KGE	\bar{S}	\bar{O}	Área
					(m ³ /s)		(km ²)
Balsa Nova	0,79	0,55	-3,2	0,62	57	56	2745
Porto Amazonas	0,81	0,34	-23,5	0,49	81	66	3625
São Mateus do Sul	0,76	0,4	-31,9	0,59	147	111	6035
Rio Negro	0,71	0,37	-35,5	0,57	81	60	3292
Rio da Varzea	0,8	0,58	-16	0,67	14	12	605
Quitandinha	0,78	-0,34	-43,8	0,25	24	16	941
São Bento	0,76	-1,58	-77	-0,08	53	30	2006
Divisa	0,69	-0,37	-65,3	0,24	208	126	8050
União da Vitória	0,74	0,23	-51,1	0,46	639	423	24209
Porto Vitória	0,73	0,56	-31,7	0,65	655	497	24735
Jangada	0,79	0,57	-33,9	0,63	35	26	1014
Madeira Gavazzoni	0,85	0,35	-53,7	0,44	34	22	976
Solais Novo	0,82	0,42	-49,4	0,5	61	41	1654
Usina Cavernoso	0,82	0,44	-54,8	0,44	47	31	1492
Salto Claudelino	0,8	0,76	-13,4	0,7	60	53	1655
Porto Palmeirinha	0,84	0,79	-15,3	0,72	108	94	3340
Ponte do Vitorino	0,82	0,72	-24,9	0,73	15	12	495
Águas do Vere	0,86	0,81	-18,8	0,73	207	174	6692
Flor da Serra	0,87	0,84	-11,3	0,78	225	202	7237
Porto Santo Antônio	0,74	0,2	-74,1	0,24	39	23	1084
Salto Caxias	0,5	0,41	-21,3	0,59	1656	1366	57060
São Sebastião	0,67	0,6	-24,1	0,63	38	31	1314
Porto Capanema	0,7	0,43	-32,7	0,63	1908	1438	63884

Área= Área de drenagem da estação fluviométrica referente; R² = coeficiente de determinação; Nash = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta

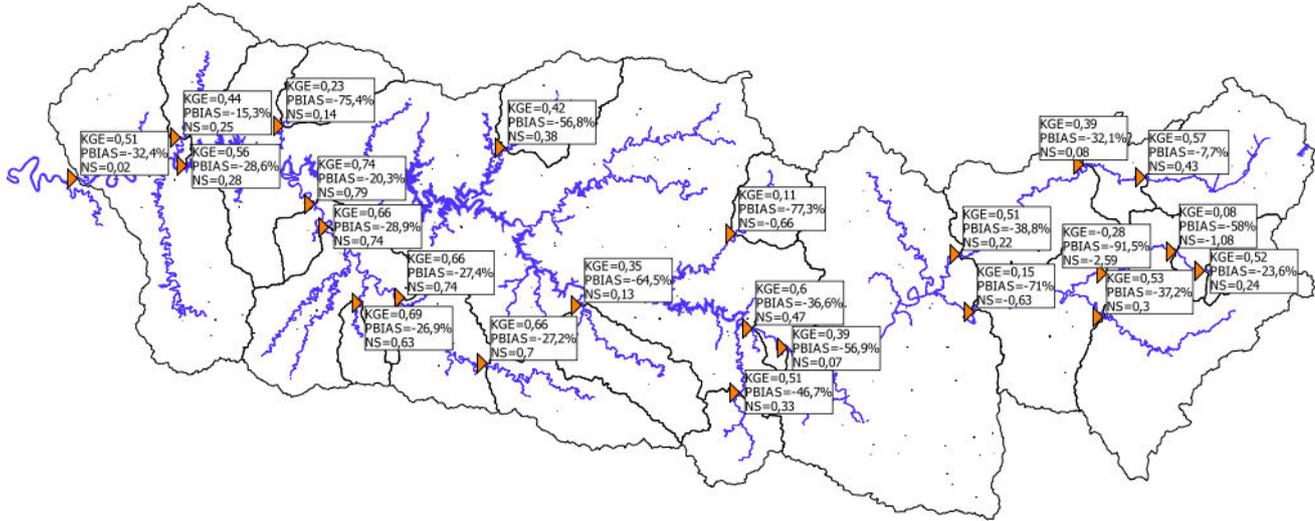


Figura 5.3: Coeficientes de desempenho da vazão mensal simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguazu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.

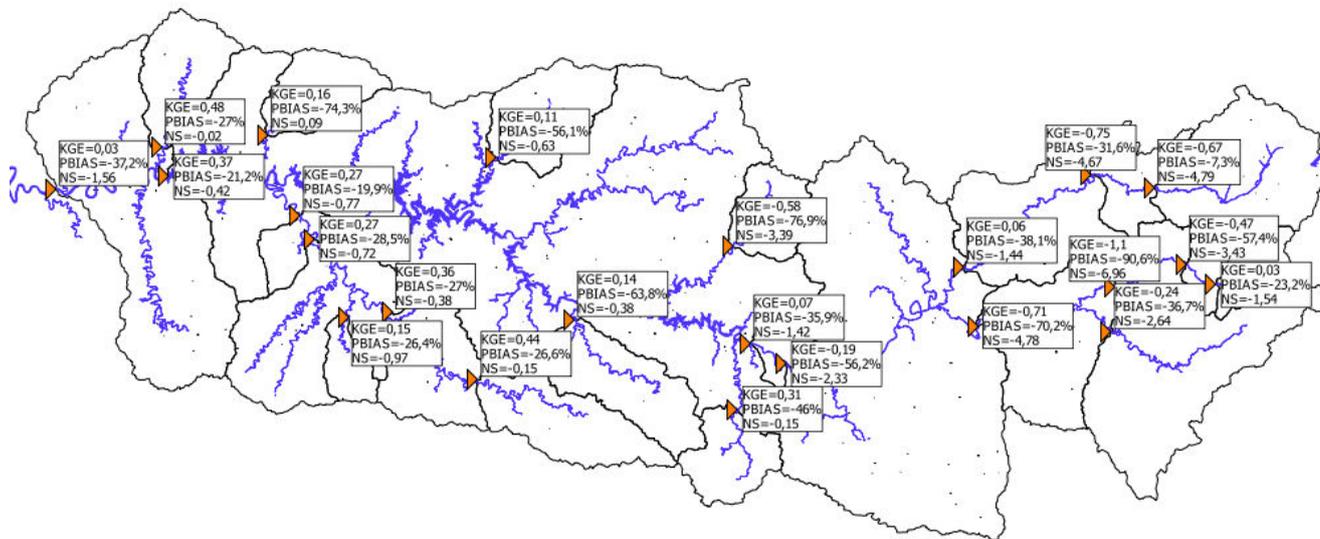


Figura 5.4: Coeficientes de desempenho da vazão diária simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguazu, com interpolação padrão da precipitação pelo SWAT.

5.3. Interpolação espacial dos dados de precipitação

Os dados de precipitação da bacia do rio Iguazu foram interpolados em escala diária, para todo o período de 1990 a 2012. Os erros calculados através da validação cruzada referentes a cada método estão apresentados na Tabela 5.4. A interpolação com polígonos de Thiessen apresentou os maiores erros médios. O inverso da potência da distância apresentou erros médios similares aos métodos de krigagem, que por sua vez, apresentaram os menores erros médios. Dentre os métodos disponíveis, a krigagem simples apresentou os menores erros, sendo utilizada nas etapas seguintes do trabalho.

Tabela 5.4: Erro médio (mm) de cada método de interpolação de precipitação diária disponível no PCP SWAT.

Método	Erro absoluto médio	Erro quadrático médio
Polígonos de Thiessen	4,19	112,11
Inverso da potência da distância	3,56	72,16
Krigagem simples, com diferentes médias locais com elevação como variável externa	3,52	65,28
Krigagem ordinária	3,45	66,18
Krigagem com deriva externa	3,61	72,96
Krigagem simples	3,49	64,74

5.4. Desempenho do modelo não calibrado após a interpolação espacial dos dados de precipitação

Os dados de precipitação foram interpolados em escala diária com o método de krigagem simples e o desempenho do modelo não calibrado foi reavaliado. Os coeficientes de desempenho das diferentes estações fluviométricas da bacia estão apresentados na Figura 5.5 e Figura 5.6 e sumarizados em escala mensal na Tabela 5.5, e em escala diária na Tabela 5.6. A interpolação dos dados de precipitação diária com krigagem simples traz melhoria para o desempenho de todas bacias analisadas. Os maiores impactos da interpolação da precipitação são notados nas bacias que drenam para as estações Madeireira Gavazzoni (código: 65764000), São Bento (código: 65155000) e Quitandinha (código: 65136550), como pode ser visualizado nas Figura 5.7 e Figura

5.8. Após a interpolação dos dados de precipitação, somente a estação de São Bento apresenta valor negativo de KGE em escala mensal.

A Figura 5.9 traz os histogramas dos índices de desempenho analisados em escala mensal e diária, após a interpolação da precipitação com krigagem simples. Em escala diária os índices KGE, R^2 e o coeficiente de Nash-Sutcliffe possuem valores significativamente inferiores aos da escala mensal. Em ambas escalas temporais todas as estações apresentam valores negativos de PBIAS, e somente 10 delas apresentam valores menores que $|\pm 25\%|$.

Tabela 5.5: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado com precipitação diária interpolada com krigagem simples, em escala mensal para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçú.

Estação	R ²	Nash	PBIAS	KGE	\bar{S} (m ³ /s)	\bar{O}	Área (km ²)
Balsa Nova	0,1	-4,79	-7,3	-0,67	60	56	2745
Porto Amazonas	0,21	-4,67	-31,6	-0,75	86	66	3625
São Mateus do Sul	0,22	-1,44	-38,1	0,06	154	112	6035
Rio Negro	0,15	-2,64	-36,7	-0,24	82	60	3292
Rio da Varzea	0,23	-1,54	-23,2	0,03	15	12	605
Quitandinha	0,25	-3,43	-57,4	-0,47	26	16	941
São Bento	0,14	-6,96	-90,6	-1,1	58	30	2006
Divisa	0,13	-4,78	-70,2	-0,71	215	126	8050
União da Vitória	0,19	-2,33	-56,2	-0,19	662	424	24209
Porto Vitória	0,19	-1,42	-35,9	0,07	677	498	24735
Jangada	0,51	-0,15	-46	0,31	38	26	1014
Madeireira Gavazzoni	0,24	-3,39	-76,9	-0,58	39	22	976
Solais Novo	0,51	-0,38	-63,8	0,14	67	41	1654
Usina Cavernoso	0,44	-0,63	-56,1	0,11	48	31	1492
Salto Claudelino	0,36	-0,15	-26,6	0,44	67	53	1655
Porto Palmeirinha	0,33	-0,38	-27	0,36	119	94	3340
Ponte do Vitorino	0,33	-0,97	-26,4	0,15	15	12	495
Águas do Vere	0,23	-0,72	-28,5	0,27	225	175	6692
Flor da Serra	0,24	-0,77	-19,9	0,27	243	203	7237
Porto Santo Antônio	0,49	0,09	-74,3	0,16	40	23	1084
Salto Caxias	0,19	-0,42	-21,2	0,37	1661	1371	57060
São Sebastião	0,34	-0,02	-27	0,48	40	31	1314
Porto Capanema	0,21	-1,56	-37,2	0,03	1972	1437	63884

Área= Área de drenagem da estação fluviométrica referente; R² = coeficiente de determinação; Nash = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

Tabela 5.6: Coeficientes de desempenho da vazão simulada pelo modelo não calibrado com precipitação diária interpolada com krigagem simples, em escala diária para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguaçu.

Estação	R²	Nash	PBIAS	KGE	\bar{S}	\bar{O}	Área
					(m³/s)		(km²)
Balsa Nova	0,12	-3,49	-2,7	-0,41	57	56	2745
Porto Amazonas	0,24	-3,39	-22,9	-0,48	81	66	3625
São Mateus do Sul	0,24	-1	-31,2	0,2	146	112	6035
Rio Negro	0,16	-1,98	-35	-0,07	81	60	3292
Rio da Varzea	0,29	-0,81	-15,2	0,25	14	12	605
Quitandinha	0,28	-2,33	-43	-0,22	24	16	941
São Bento	0,17	-4,91	-76,1	-0,74	53	30	2006
Divisa	0,14	-3,81	-64,5	-0,52	208	126	8050
União da Vitória	0,21	-1,82	-50,4	-0,06	637	424	24209
Porto Vitória	0,21	-1,08	-31,1	0,18	653	498	24735
Jangada	0,56	0,23	-33,4	0,52	35	26	1014
Madeira Gavazzoni	0,53	-0,33	-53,1	0,2	34	22	976
Solais Novo	0,59	0,24	-48,9	0,42	61	41	1654
Usina Cavernoso	0,53	-0,01	-54,1	0,32	47	31	1492
Salto Claudelino	0,37	0,15	-13,1	0,58	60	53	1655
Porto Palmeirinha	0,36	-0,04	-14,9	0,52	108	94	3340
Ponte do Vitorino	0,49	-0,29	-24,6	0,33	15	12	495
Águas do Vere	0,26	-0,39	-18,5	0,4	207	175	6692
Flor da Serra	0,26	-0,43	-11	0,39	225	203	7237
Porto Santo Antônio	0,54	0,28	-73,1	0,21	39	23	1084
Salto Caxias	0,21	-0,24	-16,7	0,42	1599	1371	57060
São Sebastião	0,35	0,08	-23,7	0,52	39	31	1314
Porto Capanema	0,22	-1,26	-32,5	0,12	1905	1437	63884

Área = Área de drenagem da estação fluviométrica referente; *R²* = coeficiente de determinação; *Nash* = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; *PBIAS* = percentual de tendência; *KGE* = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

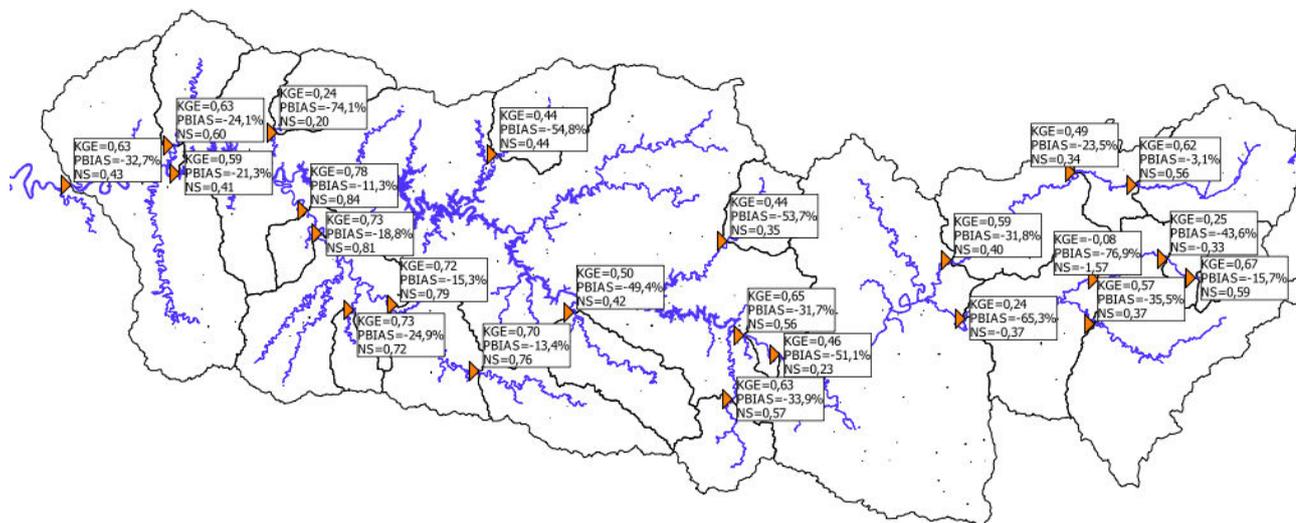


Figura 5.5: Coeficientes de desempenho da vazão mensal simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguazu, com interpolação da precipitação por krigagem simples.

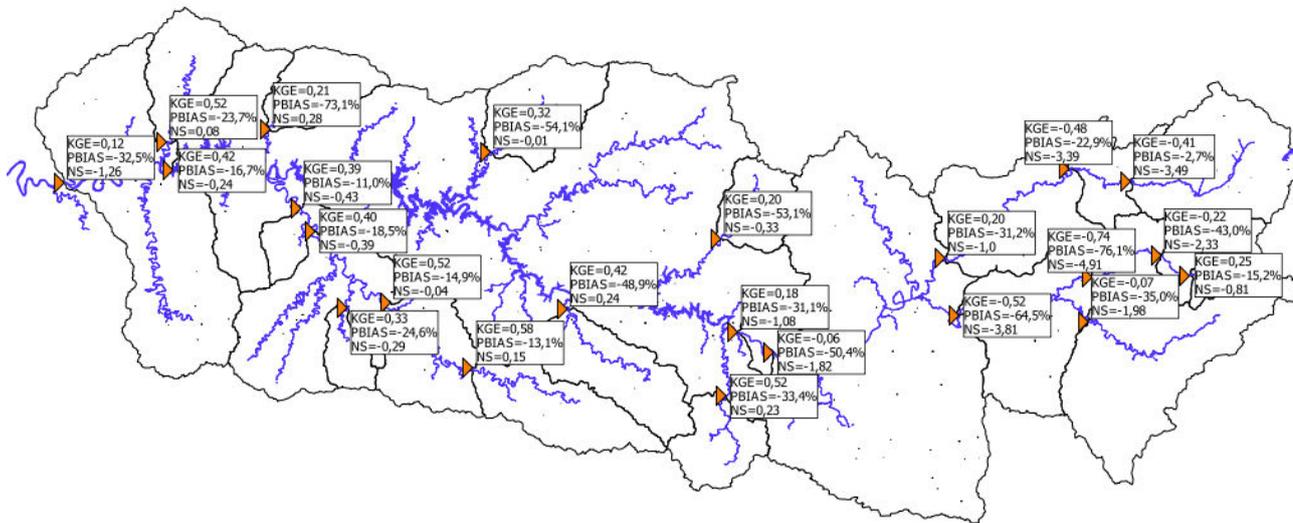


Figura 5.6: Coeficientes de desempenho da vazão diária simulada pelo modelo não calibrado, para o período de 2006 a 2009, na bacia do rio Iguazu, com interpolação da precipitação por krigagem simples.

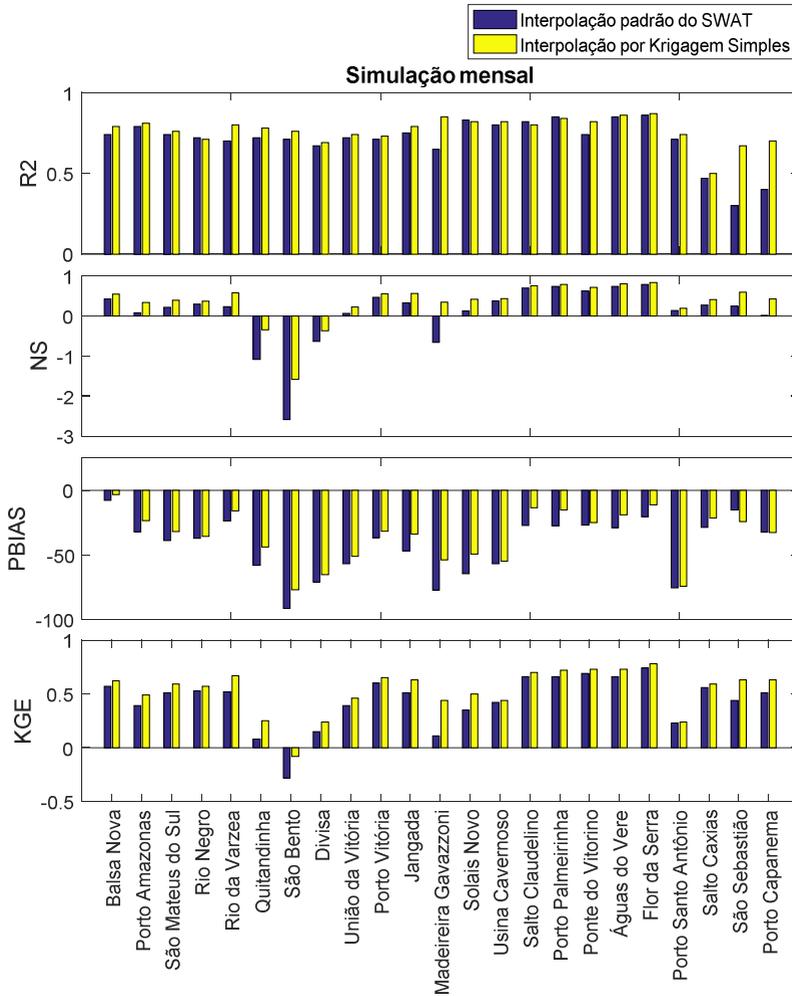


Figura 5.7: Comparação dos coeficientes de desempenho com e sem interpolação dos dados de precipitação. Período de 2006 a 2009, escala mensal. R^2 = coeficiente de determinação; Nash = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

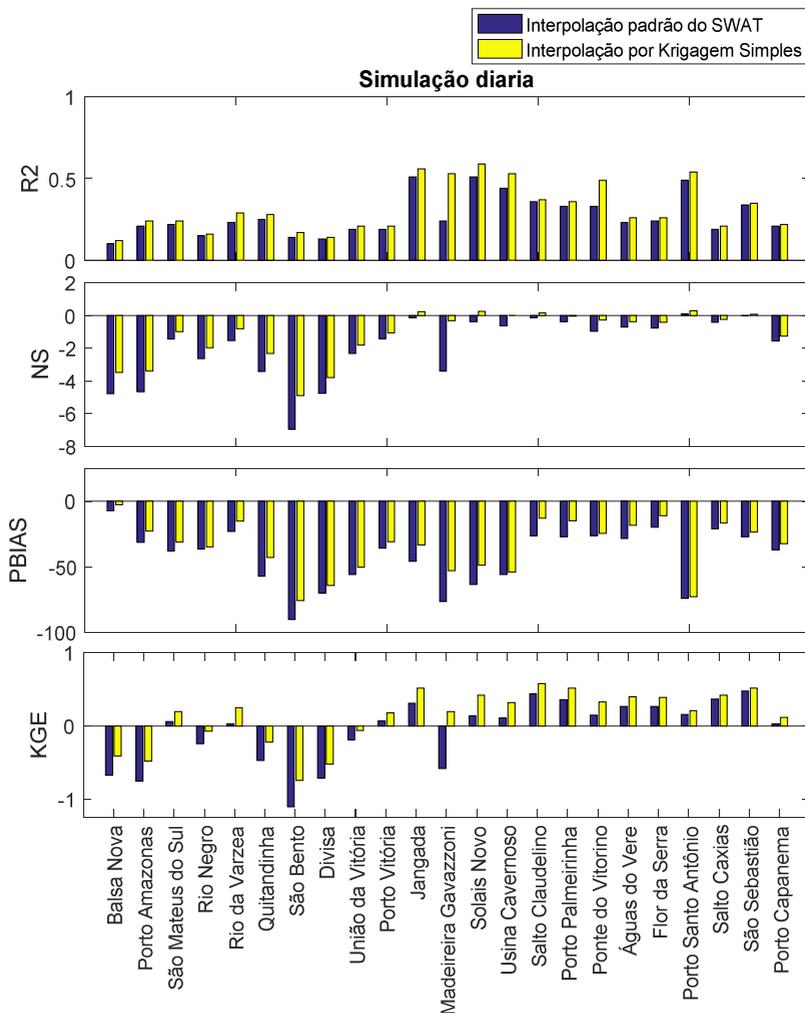


Figura 5.8: Comparação dos coeficientes de desempenho com e sem interpolação dos dados de precipitação. Período de 2006 a 2009, escala mensal. R^2 = coeficiente de determinação; Nash = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

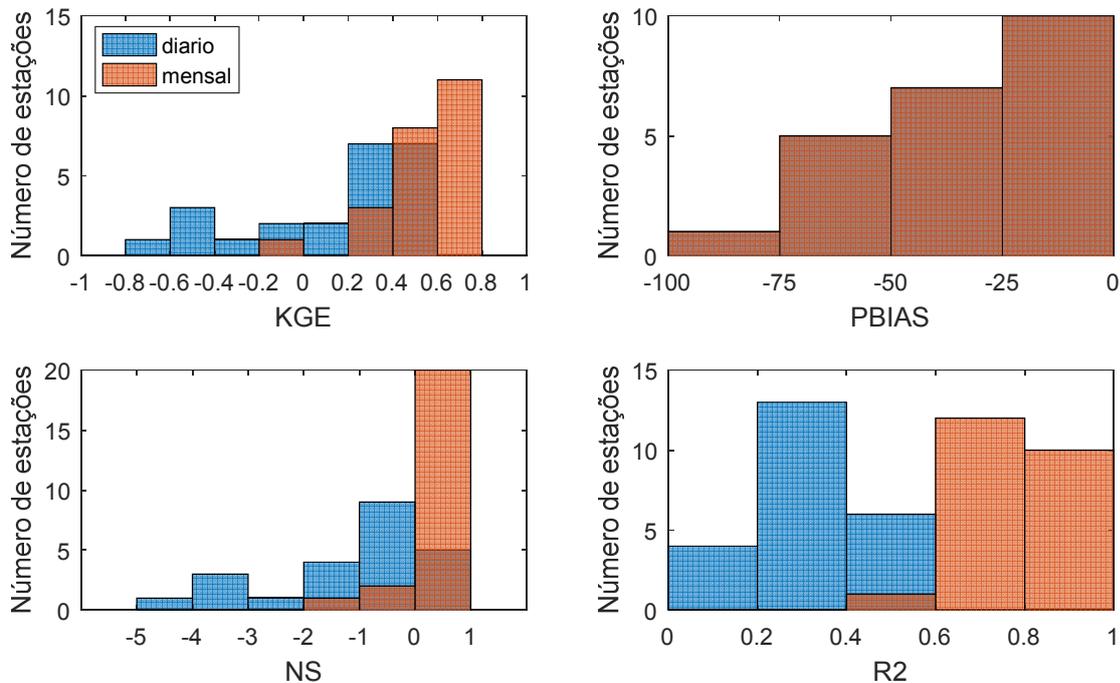


Figura 5.9: Coeficientes de desempenho do modelo não calibrado, após interpolação da precipitação por krigagem simples, para simulação diária e mensal.

Os coeficientes de correlação de Pearson entre os diferentes indicadores de desempenho analisados e a área de contribuição das bacias é apresentado na Tabela 5.7. Os coeficientes de determinação (R^2), em ambas escalas mensal e diária, diminuem com o aumento da área de contribuição correspondente. Os demais índices de desempenho analisados não apresentam correlação significativa com a área de contribuição das bacias.

Tabela 5.7: Coeficientes de correlação de Pearson entre os indicadores de desempenho da vazão e a área de contribuição das bacias correspondentes.

	R^2	Nash	PBIAS	KGE
Precipitação interpolada pelo método padrão do SWAT				
mensal	-0,56	0,07	0,16	0,18
diário	-0,31	0,12	0,18	0,16
Precipitação interpolada com Krigagem simples				
mensal	-0,65	0,05	0,10	0,15
diário	-0,36	0,02	0,12	0,06

Valores em vermelho não são significativos a um nível de significância de 0,05. R^2 = coeficiente de determinação; Nash = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

Evapotranspiração

A correlação espacial entre as estimativas de evapotranspiração real simulada pelo SWAT e obtida pelo METRIC foram avaliadas a nível de subbacia e apresentaram correlação significativa (a um nível de significância de 0,05) para a maioria dos meses avaliados (Tabela 5.8). O coeficiente de correlação de Pearson variou de 0,12 (março de 2009) a 0,78 (outubro de 2006). Para o mês de janeiro de 2009 a correlação apresentada é negativa, e para o mês de fevereiro de 2009 não se estabelece uma correlação significativa entre os valores. Apesar da correlação entre os valores, observa-se uma forte subestimativa do modelo SWAT em relação aos valores do METRIC (Figura 5.10). A tendência de subestimativa do SWAT fica evidenciada para os meses mais quentes, onde os volumes evapotranspirados são maiores, como pode ser observado pela Figura 5.10.

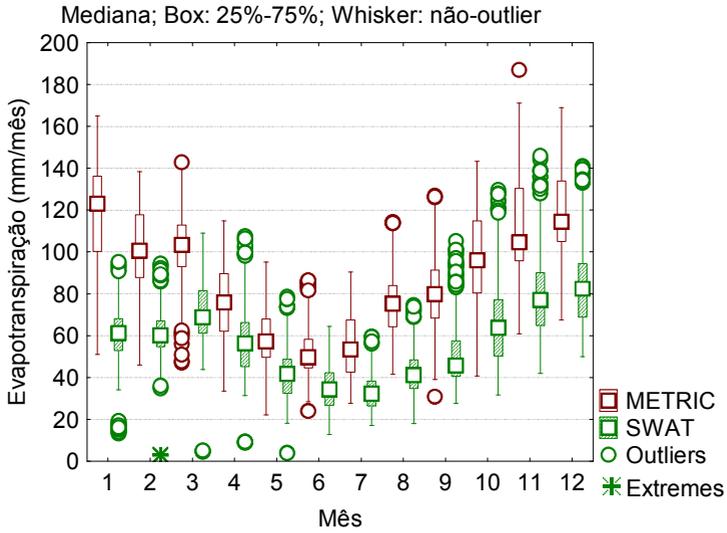


Figura 5.10: Evapotranspiração real média mensal estimada pelo SWAT e METRIC.

Tabela 5.8: Coeficiente de correlação de Pearson entre as estimativas de evapotranspiração real do SWAT e METRIC, a nível de subbacia..

Ano	Mês												média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2006	0,29	0,41	0,34	0,43	0,45	0,67	0,52	0,61	0,54	0,80	0,78	0,67	0,73
2007	0,58	0,59	0,17	0,68	0,12	0,12	0,32	0,60	0,50	0,53	0,73	0,45	0,75
2009	-0,15	-0,05	0,12	0,39	0,38	0,66	0,69	0,47	0,36	0,66	0,36	0,35	0,66
média	0,13	0,26	0,20	0,47	0,29	0,52	0,54	0,53	0,55	0,69	0,68	0,40	0,71

(valores destacados em vermelho não são significativos a 5% de confiança)

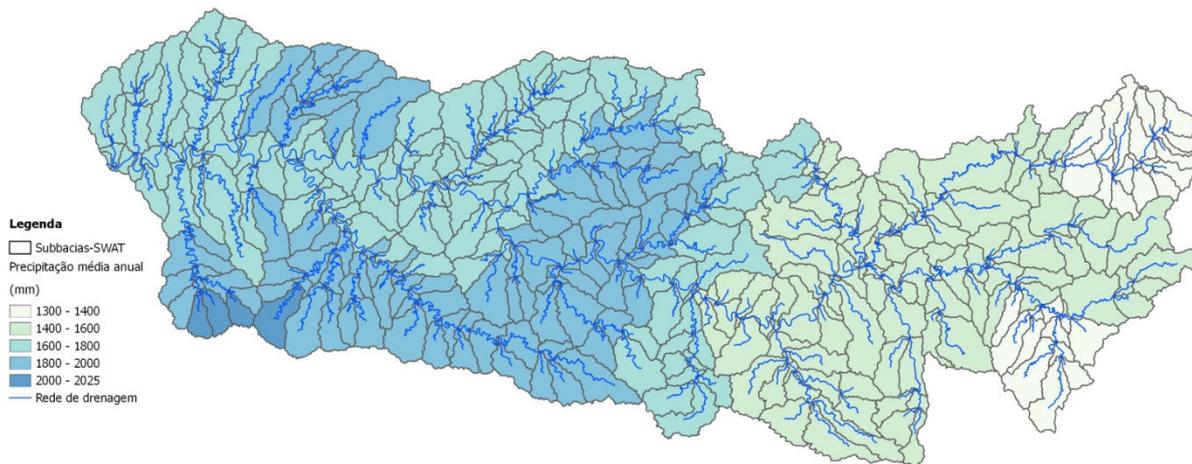


Figura 5.11: Precipitação média anual para o período 2006-2009.

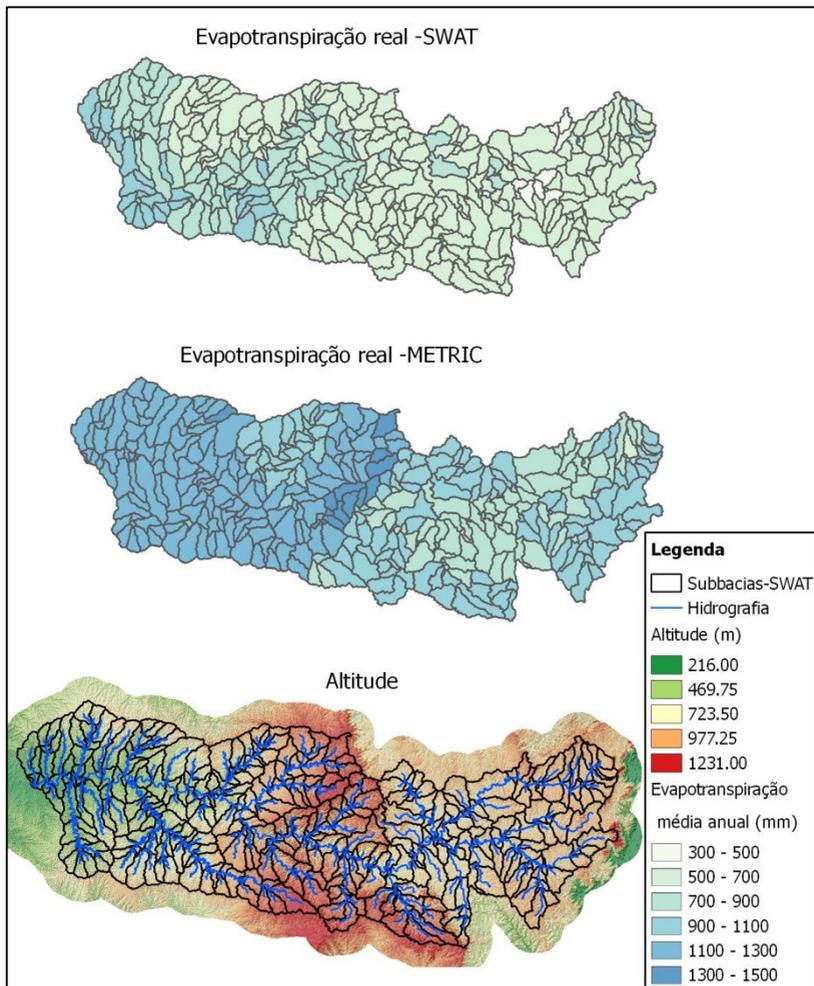


Figura 5.12: Evapotranspiração média anual (METRIC e SWAT) e altitude da bacia do rio Iguazu.

A média anual da evapotranspiração real da bacia do rio Iguazu, estimada pelo METRIC (2006, 2007 e 2009) e calculada pelo SWAT não calibrado (2006 a 2009), pode ser visualizada na Figura 5.12 juntamente com a altitude da bacia. Ambas as metodologias de estimativa da evapotranspiração apresentam relação espacial com a distribuição da chuva na bacia, que pode ser visualizada na Figura 5.11. O SWAT e o METRIC utilizam dados de estações meteorológicas para

cálculo da evapotranspiração potencial, porém, as estimativas de evapotranspiração real apresentadas pelo SWAT se apresentam mais sensíveis à variabilidade espacial dos dados meteorológicos do que o METRIC. As estimativas apresentadas pelo METRIC apresentam forte relação com a topografia da bacia, o que não é observado no SWAT.

5.5. Análise de sensibilidade relativa inicial

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros selecionados para análise de sensibilidade e os respectivos intervalos e métodos de ajuste do valor. A maior parte dos parâmetros selecionados para análise de sensibilidade controlam a fase de propagação no canal e de escoamento superficial. Poucos parâmetros analisados influenciam a estimativa da evapotranspiração real mensal. Os resultados da análise de sensibilidade dependem das variáveis incluídas na função objetivo e da escala temporal considerada.

A Figura 5.13 apresenta os resultados da análise de sensibilidade relativa dos parâmetros para a evapotranspiração e para a vazão (média de todas as estações fluviométricas da bacia). A evapotranspiração não se apresentou sensível aos parâmetros EPCO e ESCO, ao contrário do esperado, já que ambos são coeficientes relacionados às estimativas de evapotranspiração real. Através dos resultados da análise de sensibilidade, os parâmetros aos quais a vazão e evapotranspiração se mostraram mais sensíveis foram selecionados, limitados a um máximo de 12.

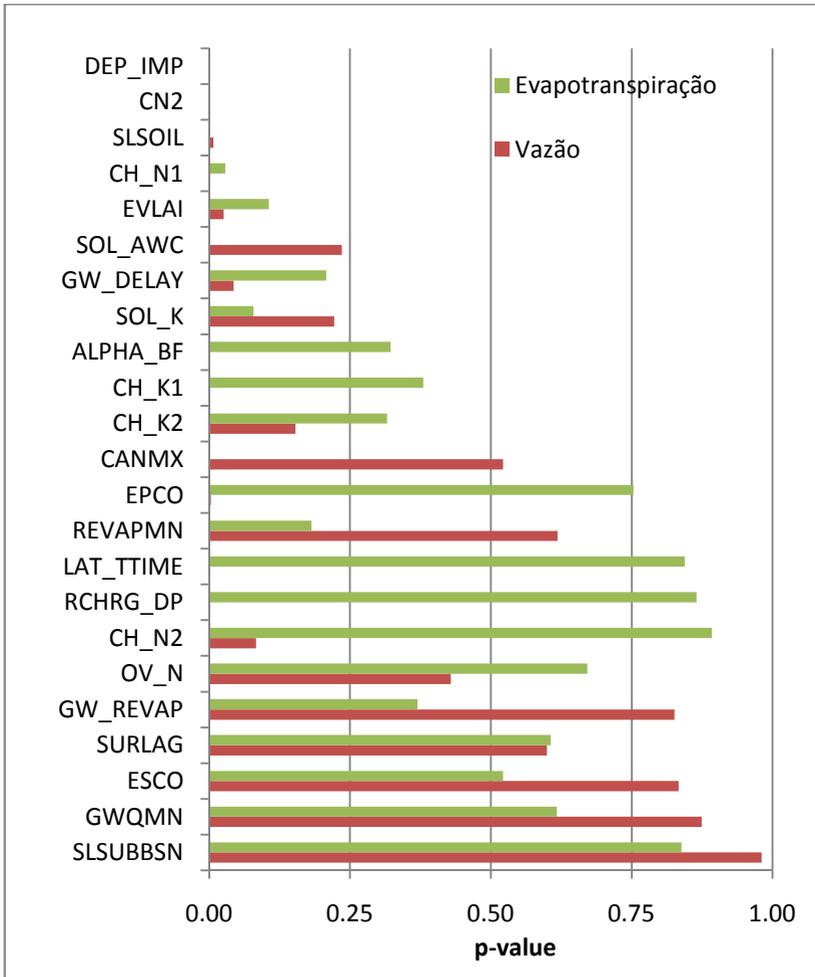


Figura 5.13: Sensibilidade relativa dos parâmetros, de acordo com a variável da função objetivo.

5.6. Calibração e validação

A validação espacial e temporal do modelo foi realizada utilizando 23 diferentes estações fluviométricas. Devido ao elevado número de estações fluviométricas, quatro diferentes estações, incluindo o exutório, e a média de todas foram selecionadas para análises aprofundadas e estão apresentadas a seguir. As estações, e respectivas subbacias, são:

- Porto Capanema (código: 65987000), no exutório da bacia do rio Iguaçú (Área de drenagem: 63.884 km²);
- União da Vitória (código: 65310000), no meio da bacia e drenando 38% da área total modelada (Área de drenagem: 24.209 km²);
- São Bento (código: 65155000), representativa das subbacias de cabeceira e exibindo sempre o pior desempenho entre todas as localidades (Área de drenagem: 2.006 km²);
- Jangada (código: 65370000), uma pequena subbacia com desempenho médio aceitável (Área de drenagem: 1.014 km²).

Desempenho do modelo em escala mensal

No SUFI-2, o intervalo dos parâmetros (*range_par*) é reduzido a cada iteração, sempre centrado naqueles que resultaram no melhor valor da função objetivo. As estratégias E5 e E6 apresentaram o mesmo intervalo final para os parâmetros calibrados (Tabela 5.14). Após a primeira iteração, onde a evapotranspiração foi incluída na função objetivo, os intervalos foram restringidos e o conjunto ótimo de parâmetros da segunda iteração foi o mesmo para o exutório (E5) e para a média de todas as estações (E6). Os resultados das estratégias E5 e E6 serão referidos como E5=E6 deste ponto em diante.

A correlação entre os parâmetros calibrados não é significativa em nenhuma das estratégias de calibração analisada, variando de 10^{-5} a 10^{-2} , e os valores podem ser verificados no Apêndice III.

Os resultados das melhores simulações de cada estação (e média) das calibrações e validações em escala mensal estão apresentados na Tabela 5.9. O desempenho inicial do modelo não calibrado (E0) também é indicado na tabela, para comparação. De acordo com Moriasi et al. (2007) valores de NS acima de 0,50 são considerados aceitáveis, valores entre 0,65-0,75 são classificados como “bons” e valores acima de 0,75 são “muito bons” para simulação de vazão em escala mensal. Similarmente, PBIAS \leq +25% são classificados como aceitáveis e PBIAS \leq +10% são “muito bons”. Estas classificações, no entanto, não são determinantes e o objetivo do projeto, bem como as condições locais e tamanho da área modelada, devem ser levados em conta na avaliação do desempenho de um modelo. De acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007) e a Tabela 5.9, a maioria dos valores de NS são “bons” (0,65-0,75) e os valores de PBIAS para o exutório são “muito bons” (\leq +10%).

No exutório, os valores de KGE variam de 0,70 a 0,88 e o NS varia de 0,58 a 0,77, entre todas as estratégias e ambos períodos. Para as demais estações fluviométricas, KGE varia de 0,67 a 0,89 em União da Vitória, e de 0,62 a 0,80 para a média de todas estações (Tabela 5.9). A Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam a distribuição espacial dos índices de desempenho para cada estação fluviométrica. Valores de NS variam de 0,63 a 0,77 para a média e de 0,72 a 0,86 em União da Vitória. Estes resultados sugerem que, para a simulação mensal, a calibração convencional (E1-somente exutório) é capaz de alcançar desempenho satisfatório também para as subbacias a montante do exutório. A calibração *multi-site* (E3), por sua vez, é capaz de aperfeiçoar a simulação espacial (subbacias) sem depreciar significativamente o desempenho da simulação no exutório. O desempenho médio da calibração *multi-site* e multi-variável (E5=E6) supera a calibração convencional (E1), mas o desempenho do exutório é ligeiramente prejudicado (KGE de 0,88 a 0,81 para o período de calibração, e 0,83 a 0,79 para o período de validação).

Em ambos os períodos de calibração e validação, a calibração convencional (E1) apresenta os maiores valores de NS e KGE para o exutório, enquanto E3 apresenta os maiores valores de NS e KGE para a média. Estes resultados são esperados para o período de calibração, pois as estratégias de calibração obtêm a melhor parametrização possível para o exutório em E1, e para a média em E3. A estratégia E2 apresenta os piores NS e KGE para a média e o exutório. As estratégias E2 e E4 tendem a exibir índices KGE inferiores às demais estratégias, o que pode ser resultado da utilização da evapotranspiração na função objetivo da segunda iteração.

As curvas de permanência para o exutório indicam que E1 é a estratégia que mais subestima vazões baixas, enquanto E2 apresenta o melhor ajuste à curva dos dados observados. O índice KGE é influenciado pelo PBIAS, que representa uma média entre as super e subestimativas de vazões, de modo que um valor absoluto baixo pode ser resultado de compensação entre sub e superestimativas. A curva de permanência, no entanto, ilustra as sub e superestimativas que ocorrem em todas as magnitudes de vazão.

União da Vitória exibe NS superiores ao exutório, indicando que os picos de vazão mensal simulados e observados concordam melhor nesta localidade, como pode ser graficamente verificado pelos hidrogramas na Figura 5.16. Entretanto, o exutório encontra-se 80 km a jusante de um grande reservatório e os registros de vazão observada sofrem influência da operação do reservatório. Os coeficientes NS no

exutório da bacia podem ser reflexo da influência da operação do reservatório nos registros de vazão.

Os hidrogramas também indicam que a simulação mensal do ano 2006, um ano excepcionalmente seco na região de estudo, é satisfatória para as quatro localidades em todas as estratégias. A simulação satisfatória da vazão em um ano excepcionalmente seco pode sugerir que a metodologia de calibração é adequada para extremos hidrológicos.

As curvas de permanência indicam uma tendência de E2 em superestimar vazões baixas para as três estações fluviométricas a montante do exutório, o que é mais evidente na estação Jangada (Figura 5.17). A análise gráfica dos hidrogramas e curvas de permanência revela uma ligeira subestimativa de vazões baixas no exutório, para a maioria das estratégias, oposto às demais localidades, que tendem a superestimar as vazões mais baixas.

Tabela 5.9: Indicadores estatísticos para a melhor simulação de cada estratégia, em escala mensal, para os períodos de calibração (2006-2009) e validação (2002-2005).

	Período	2006-2009						2002-2005					
	Estratégia	E0	E1	E2	E3	E4	E5=E6	E0	E1	E2	E3	E4	E5=E6
Média	KGE	0,53	0,73	0,66	0,76	0,69	0,74	0,59	0,77	0,62	0,80	0,67	0,79
	NS	0,35	0,72	0,63	0,72	0,72	0,70	0,42	0,68	0,66	0,77	0,72	0,74
Exutório	KGE	0,63	0,88	0,76	0,86	0,77	0,81	0,70	0,83	0,7	0,83	0,75	0,79
	Ns	0,43	0,77	0,71	0,74	0,75	0,65	0,43	0,68	0,64	0,65	0,68	0,58
	PBIAS	-32,7	2,1	-9,4	-2,8	-2,2	-3,5	-23,9	-0,9	2,8	-1,5	4,1	0,3
União da Vitória	KGE	0,46	0,91	0,71	0,90	0,75	0,82	0,56	0,88	0,67	0,89	0,71	0,86
	NS	0,23	0,86	0,74	0,82	0,75	0,73	0,4	0,81	0,72	0,85	0,82	0,79
	PBIAS	-51,1	-3,5	-5,1	-0,6	-6,3	-5,1	-43,3	-2,7	-2,8	-4,7	-7,6	-7,6
São Bento	KGE	-0,08	0,83	0,77	0,91	0,84	0,80	0,21	0,90	0,75	0,93	0,86	0,90
	NS	-1,57	0,67	0,56	0,82	0,70	0,61	-0,86	0,81	0,76	0,89	0,82	0,82
	PBIAS	-76,9	-4,8	-9,0	-0,2	-3,3	-5,3	-69,3	-1,6	-13,6	-3,2	-4,8	-3,2
Jangada	KGE	0,63	0,87	0,75	0,90	0,81	0,89	0,52	0,87	0,67	0,91	0,77	0,87
	NS	0,57	0,75	0,75	0,86	0,84	0,85	0,50	0,80	0,81	0,88	0,86	0,87
	PBIAS	-33,9	-4,9	-9,0	0,7	1,4	-4,4	-46,1	4,1	-6,1	-2,2	-8,6	-9,0

NS = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

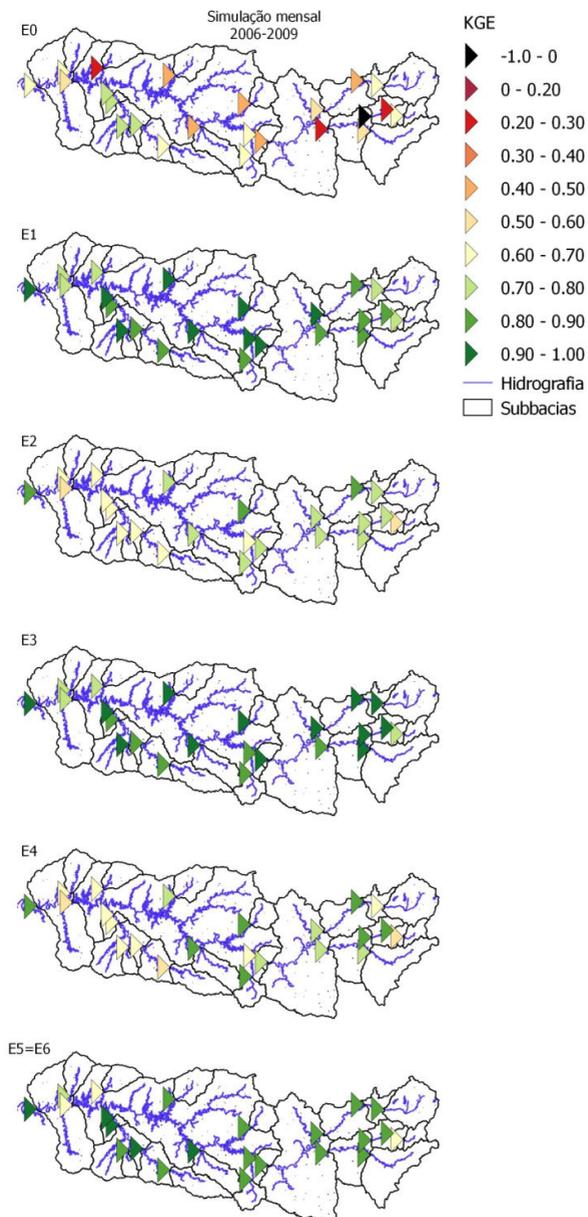


Figura 5.14: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação mensal para o período de 2006-2009.

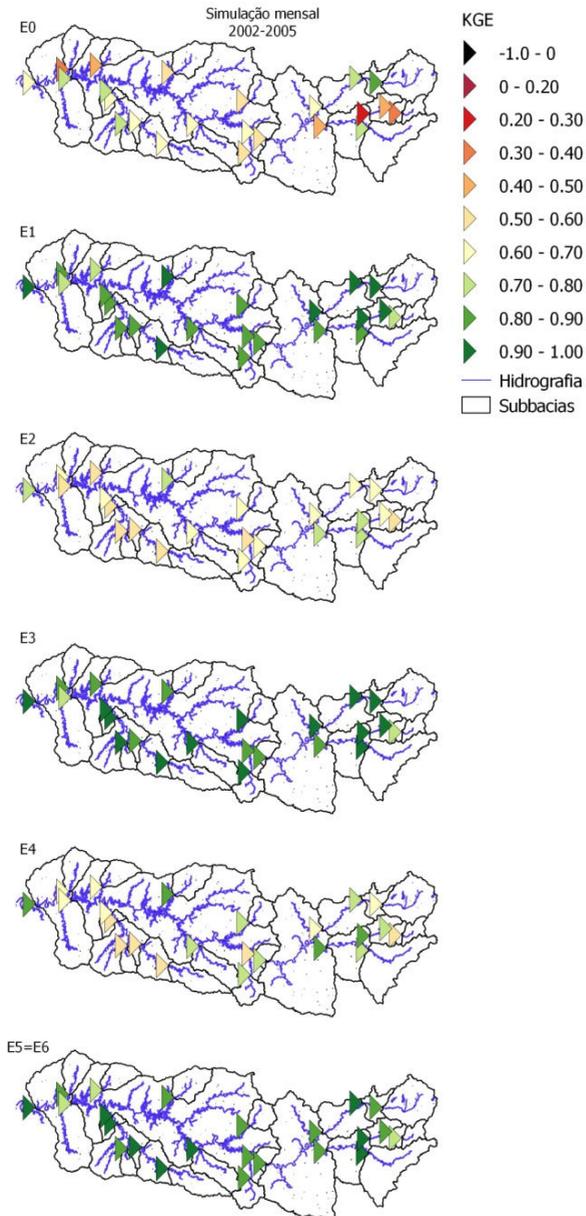


Figura 5.15: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação mensal para o período de 2002-2005.

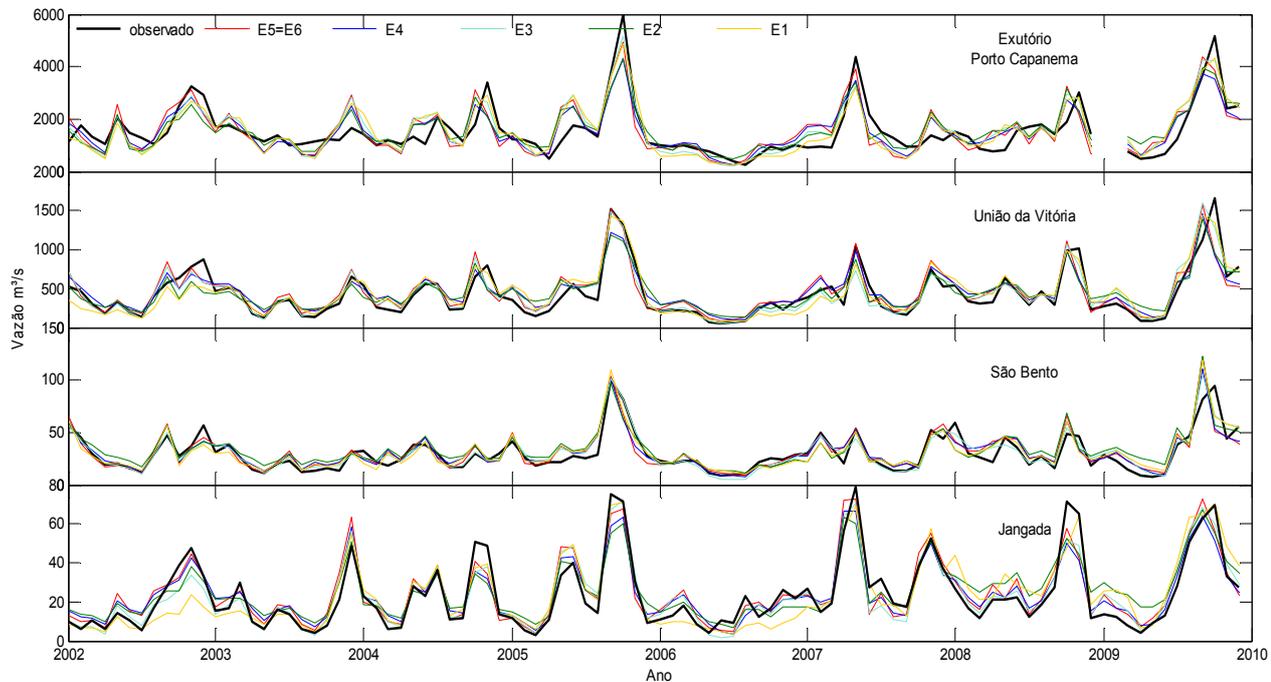


Figura 5.16: Hidrogramas mensais das melhores simulações de cada estratégia e dados observados, para as quatro estações selecionadas.

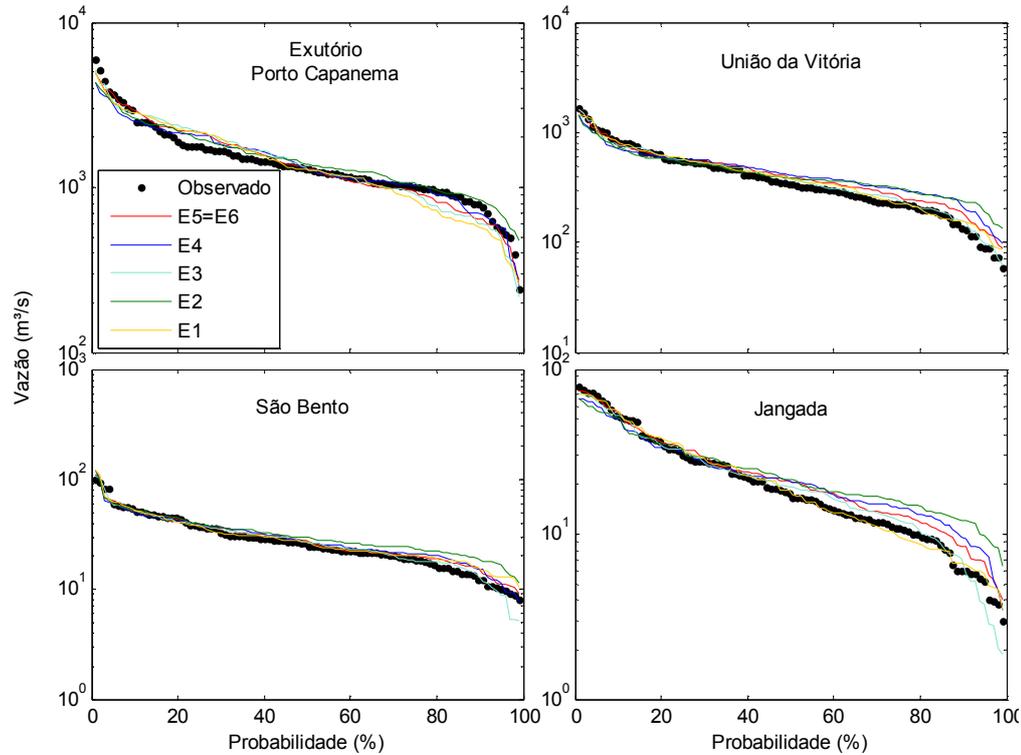


Figura 5.17: Curvas de permanência das vazões mensais simuladas e observadas, para o período de 2002-2009.

Desempenho do modelo em escala diária

Os índices estatísticos para a melhor simulação diária, isto é, a simulação apresentando o melhor KGE, de cada estação e para o valor médio estão na Tabela 5.10, bem como o desempenho inicial do modelo não calibrado (E0). Em respeito à função objetivo, o índice KGE, todas as estratégias atingem índices satisfatórios, isto é, $KGE \geq 0,50$, para a média e as quatro localidades selecionadas. No exutório, KGE variou de 0,62 a 0,70 e de 0,61 a 0,71, enquanto o NS variou de 0,31 a 0,62 e 0,24 a 0,43, para os períodos de 2006-2009 e 2002-2005, respectivamente.

O desempenho das simulações diárias é inferior às correspondentes em escala mensal (Figura 5.22). A qualidade da simulação diária de vazão pode ter sido prejudicada pelo fato de que os picos de vazão são intimamente relacionados aos parâmetros hidráulicos, principalmente da fase de propagação no canal, que foram calibrados em escala mensal e, portanto, podem não ser adequados para simulação diária de vazão. Entretanto, em comparação com o desempenho do modelo não calibrado (E0), todas as estratégias exibem KGE e NS superiores.

Para o período de validação (2002 a 2005) os coeficientes de NS são inferiores aos do período de calibração (2006 a 2009), na maior parte das localidades e estratégias. Para o período de 2002 a 2005, somente Jangada atinge valores satisfatórios de NS, isto é, $NS \geq 0,50$, em todas as estratégias. Para a estação de Jangada, KGE e NS variaram de 0,61 a 0,88 e 0,59 a 0,75, respectivamente, entre ambos períodos. Similar a simulação mensal, os valores de NS são significativamente inferiores ao KGE. É importante ressaltar que o KGE foi utilizado como função objetivo para definição da melhor simulação de cada localidade, impactando os valores de NS apresentados.

São Bento apresenta os piores índices de desempenho para as simulações diárias, com KGE e NS variando de 0,46 a 0,86 e -0,23 a 0,79, respectivamente. Na mesma estação, o PBIAS variou de -7,0% a -19,9% e de -1,3% a -17,9% para os períodos de calibração e validação, respectivamente. Valores negativos de PBIAS indicam superestimativa de vazões, o que ocorre para as baixas vazões, como pode ser verificado pelas curvas de permanência, na Figura 5.24. O fato de todas as estratégias apresentarem valores negativos de PBIAS pode sugerir erros sistemáticos de modelagem. Possíveis causas para superestimativa de vazões são a captação de água superficial para agricultura ou abastecimento urbano. União da Vitória e Jangada também apresentam

superestimativa de vazões baixas, e PBIAS variando de -2,9% a -19,9% e 0,6% a -13,6%, respectivamente. PBIAS positivos são exibidos pelo exutório, onde E1 e E2 superestimam as vazões diárias baixas.

As curvas de permanência das vazões diárias para as quatro localidades indicam boa concordância entre os dados observados e simulados por todas as estratégias. Diferentemente da curva de permanência das vazões mensais, para a simulação diária a estratégia E1 não apresenta nenhuma sub ou superestimativa clara, mesmo assim, a simulação diária de vazão apresenta desempenho inferior à mensal.

Os resultados para a melhor simulação diária de cada estratégia, para o período de 2006-2009 são apresentados na Figura 5.20 e na Figura 5.21 para o período de 2002-2005. Para os resultados do modelo não calibrado (E0) e para as calibrações no período de 2002-2005, observa-se uma clara tendência para as subbacias de cabeceira, a montante de União da Vitória, apresentarem os piores resultados da bacia. O mau desempenho destas subbacias impacta negativamente no desempenho da média e de União da Vitória.

Uma grande hidrelétrica localiza-se próxima a estação fluviométrica de Salto Caxias, 80km a montante de Porto Capanema (exutório), e a vazão é controlada pela operação do reservatório. Salto Caxias também apresenta mau desempenho para a simulação diária. Similarmente, a estação Usina Cavernoso (código 65855000) localiza-se na usina hidrelétrica Cavernoso, que opera a fio d'água no rio Cavernoso. As operações dos reservatórios não foram incluídas na simulação do modelo e, portanto, o modelo é incapaz de simular satisfatoriamente a vazão destas localidades. Por essa razão, especialmente em escala diária, os valores de NS e KGE nestas localidades, apesar de apresentados e incluídos na estimativa das médias, são pouco representativos.

A Figura 5.19 ilustra os hidrogramas dos dados medidos e simulados para o período de julho/2005 a Junho/2006. O intervalo apresentado foi reduzido por questões de espaço e visualização. Os hidrogramas indicam melhor simulação da vazão diária para o exutório do que para União da Vitória e São Bento. Jangada é a única localidade que apresenta correlação satisfatória entre os hidrogramas observado e simulados, as demais localidades, incluindo o exutório, são mal simuladas.

Diferentemente da simulação em escala mensal, os hidrogramas diários das localidades apresentadas sugerem maior concordância entre as vazões observadas e as simuladas pelas estratégias E1 e E3 em relação às demais, especialmente para o período de 2002 a 2005. Este

resultado pode ser reflexo do fato de serem as únicas estratégias de calibração a considerar somente dados de vazão, sem o uso da evapotranspiração.

Considerando a função objetivo utilizada na calibração (KGE) e o desempenho do modelo não calibrado (E0), a validação diária obteve resultados razoáveis. Porém, a simulação dos picos de vazão e os valores de NS foram insatisfatórios para algumas localidades e estratégias, especialmente no período de 2002-2005. Os resultados sugerem que a transferência de parâmetros entre escalas temporais pode ser promissora, porém, necessita mais estudos.

Tabela 5.10: Indicadores estatísticos para a melhor simulação de cada estratégia, em escala diária, para os períodos de calibração (2006-2009) e validação (2002-2005).

	Período Estratégia	2006-2009						2002-2005					
		E0	E1	E2	E3	E4	E5=E6	E0	E1	E2	E3	E4	E5=E6
Média	KGE	0,13	0,61	0,55	0,64	0,63	0,63	0,11	0,66	0,56	0,66	0,62	0,62
	NS	-1,16	0,60	0,56	0,61	0,39	0,42	-1,41	0,44	0,29	0,44	0,35	0,37
Exutório	KGE	0,12	0,69	0,62	0,7	0,69	0,64	0,05	0,71	0,62	0,67	0,66	0,61
	NS	-1,26	0,5	0,62	0,62	0,48	0,31	-1,57	0,43	0,30	0,32	0,40	0,24
	PBIAS	-32,5	-8,3	-9,3	-10,1	-6	-6	-23,7	-6,5	-1,7	-10,7	0,5	3,2
União da Vitória	KGE	-0,06	0,76	0,62	0,75	0,66	0,65	-0,14	0,84	0,58	0,72	0,63	0,64
	NS	-1,82	0,58	0,72	0,77	0,47	0,37	-2,29	0,71	0,29	0,48	0,44	0,33
	PBIAS	-50,4	-13,9	-20,9	-19,6	-8,1	-10,5	-43	-4,0	-9,0	-4,8	-2,9	-6,3
São Bento	KGE	-0,74	0,85	0,76	0,86	0,67	0,46	-0,63	0,70	0,53	0,65	0,63	0,51
	NS	-4,91	0,76	0,72	0,79	0,40	-0,23	-4,67	0,44	0,14	0,27	0,34	-0,08
	PBIAS	-76,1	-9,3	-19,9	-7,0	-7,8	-15,8	-68,6	-17,9	-5,2	-1,3	-2,4	-11,8
Jangada	KGE	0,52	0,66	0,61	0,71	0,86	0,84	0,41	0,88	0,81	0,85	0,86	0,83
	NS	0,23	0,60	0,61	0,59	0,72	0,69	0,16	0,75	0,63	0,73	0,72	0,67
	PBIAS	-33,4	-3,2	-13,6	-5,3	-1,1	-0,4	-45,8	0,6	-5,9	-6,0	-1,5	0,9

NS = coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; PBIAS = percentual de tendência; KGE = coeficiente de eficiência Kling-Gupta;

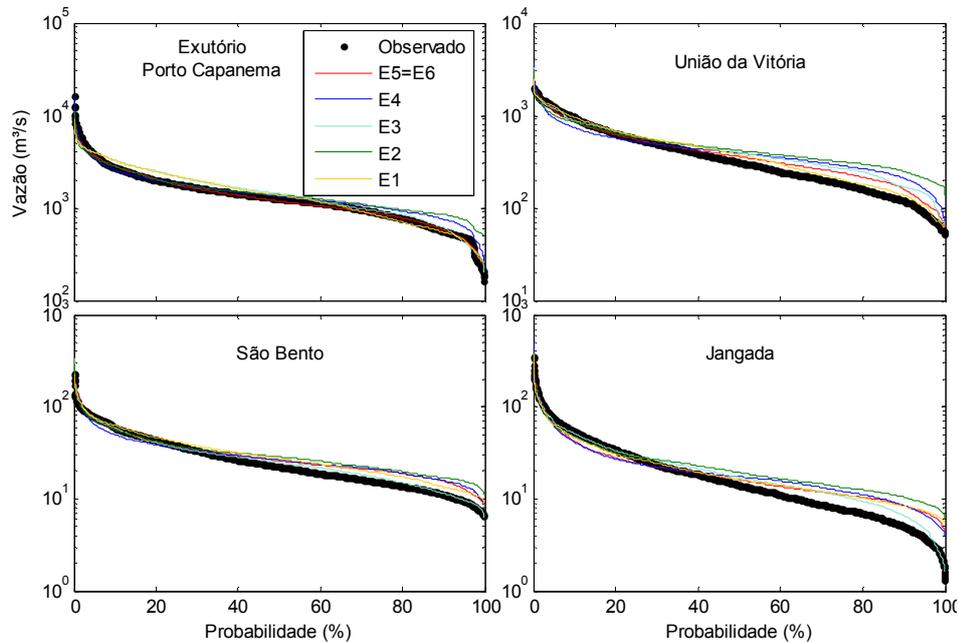


Figura 5.18: Curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas, para o período de 2002-2009.

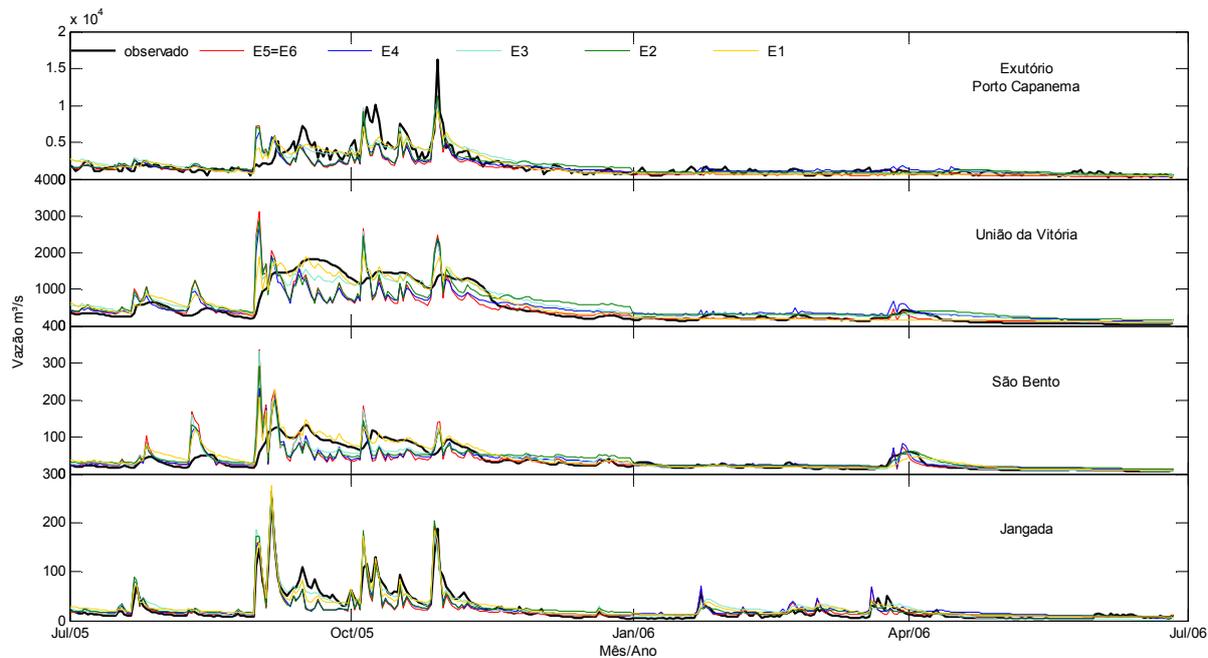


Figura 5.19: Hidrogramas diários das melhores simulações de cada estratégia e dados observados, para as quatro estações selecionadas. Período de julho/2005 a junho/2006.

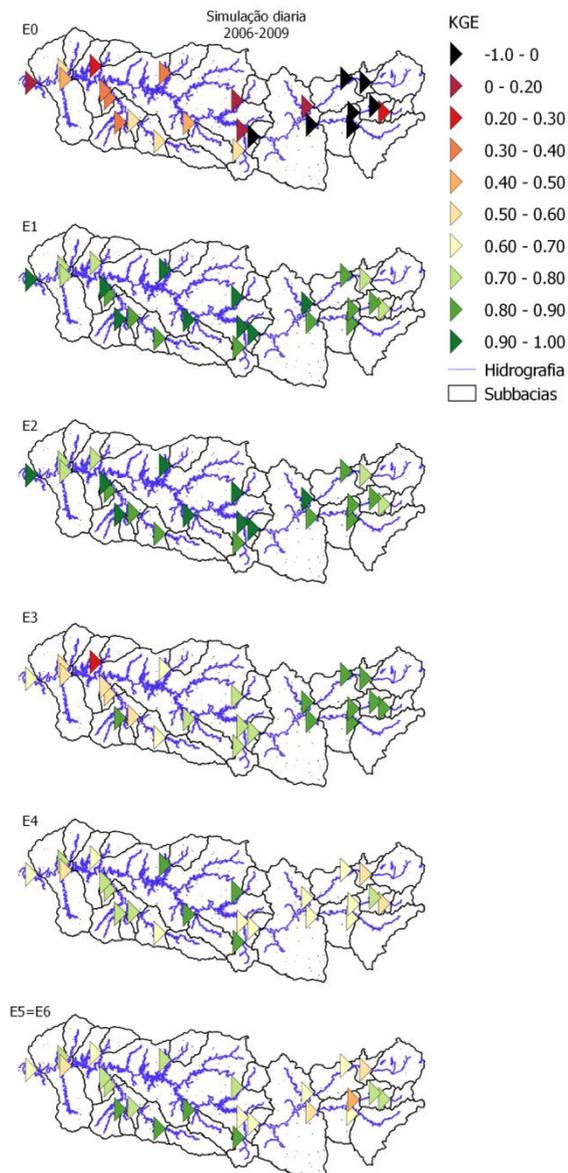


Figura 5.20: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação diária para o período de 2006-2009.

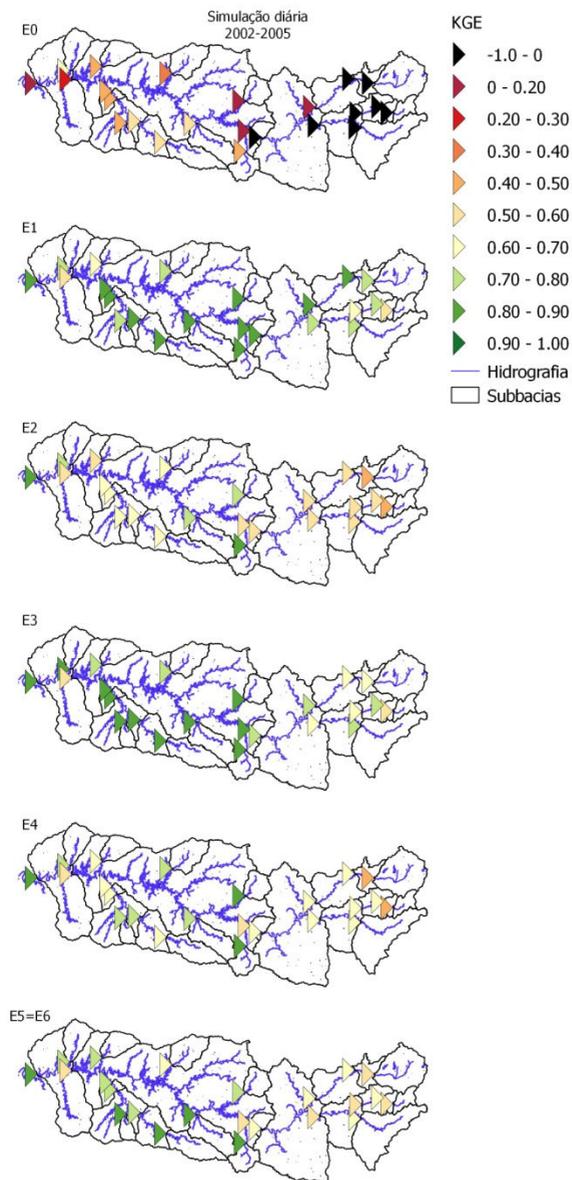


Figura 5.21: Desempenho do modelo não calibrado (E0) e melhor simulação de cada estratégia, para cada estação fluviométrica. Simulação diária para o período de 2002-2005.

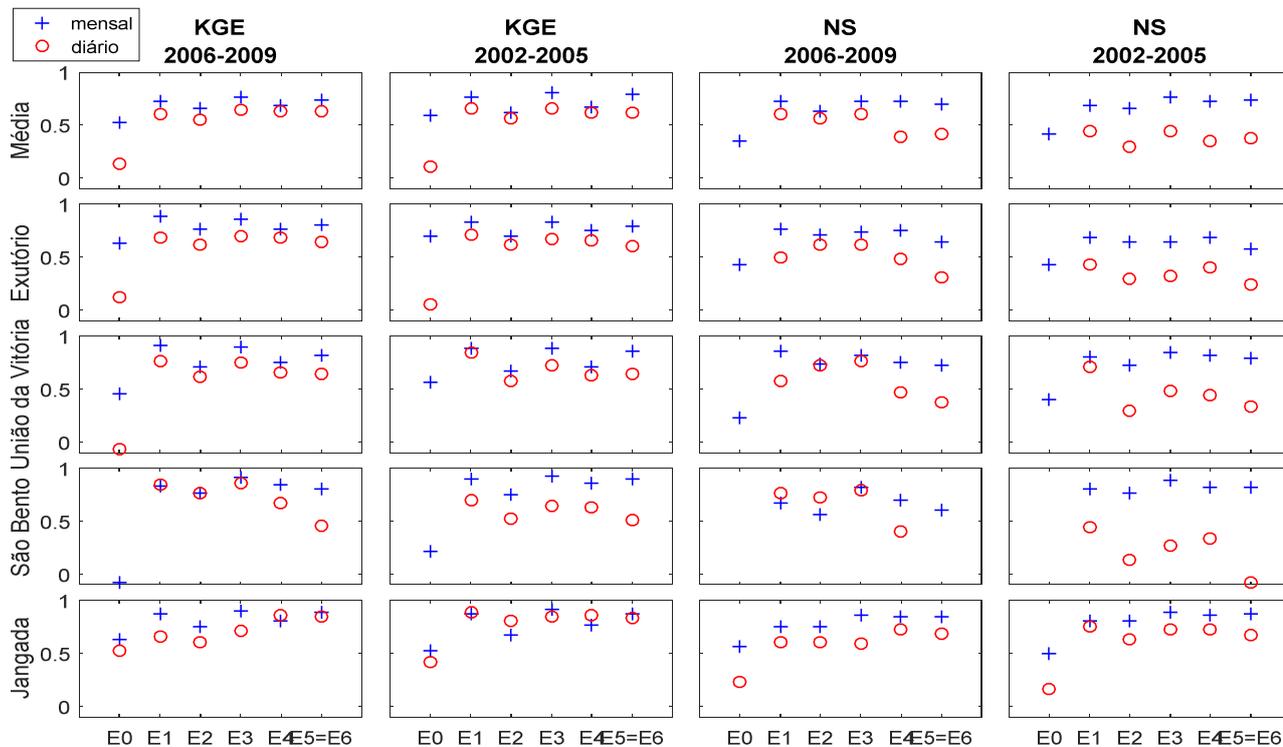


Figura 5.22: Índices de desempenho (KGE e NS) para a média e as quatro localidades selecionadas, para as simulações mensais e diárias.

Incertezas das estimativas de vazão

Os resultados das análises de incertezas, isto é, os fatores p e r , estão na Tabela 5.11, para as simulações mensais e diárias dos períodos de calibração (2006-2009) e validação (2002-2005). Em geral, as calibrações *multi-site* e/ou multi-variável reduzem as incertezas quando comparadas com a calibração convencional (E1, somente vazão do exutório), com exceção de E3 na simulação diária do período 2006-2009. A redução das incertezas com a consideração de mais séries de dados e/ou diferentes variáveis pode sugerir a habilidade do procedimento de calibração em restringir parâmetros que simulem mais adequadamente os processos refletidos pelos dados medidos das variáveis consideradas.

Os fatores p e r variam significativamente entre as diferentes estações fluviométricas analisadas, mas os fatores- p das estratégias E2 e E4 são muito baixos para a maior parte das estações e para a média. O maior número de estações atingindo fator- $p \geq 0,70$ é observado em E3, variando de 19 estações, na simulação mensal de 2002-2005, até 22 na simulação diária de 2006-2009. As estratégias E2 e E4 apresentam o menor número de estações com fator- $p \geq 0,70$, variando de 2 a 8 estações.

As simulações foram consideradas aceitáveis (*behavioral simulations*) quando atingiram KGE de 0,50, e o número de simulações aceitáveis para o exutório e média também está indicado na Tabela 5.11 e Tabela 5.12. A maior parte das estratégias apresenta mais simulações aceitáveis para a escala mensal do que para a escala diária, com exceção de E4. A estratégia E4 é também a que apresenta mais simulações aceitáveis na escala diária, para ambos períodos (2002-2005 e 2006-2009). Apesar disto, o fator- p em E4 é muito baixo para a maior parte das estações. Isto pode ser reflexo de seu estreito envelope de estimativas de vazão (95PPU), indicada pelo baixo fator- r . A estratégia E5(=E6) apresenta o maior número de simulações aceitáveis para a escala mensal. Em ambas escalas temporais, E2 apresenta o menor número de simulações aceitáveis. Estes resultados sugerem que o SWAT responde de maneira diferente aos parâmetros, para simulações em escalas temporais diferentes, e a transferência de parâmetros entre diferentes escalas temporais deve ser realizada com cautela.

O alto número de estações com fator- p acima de 0,70 para E3, em todos os períodos e escalas temporais, juntamente com o grande número

de simulações aceitáveis (*behavioral simulations*), sugere robustez desta estratégia de calibração.

São Bento exibe os mais altos valores do fator-r, apresentando também altos fatores-p, mas apesar de englobar boa parte dos dados medidos, a vazão desta subbacia é mal simulada por todas estratégias. A grande incerteza nesta subbacia e nas demais localizadas na cabeceira da bacia do rio Iguazu pode ser resultado de simulação insatisfatória dos processos hidrológicos de cabeceira. Além do mau desempenho da simulação, o aumento nas incertezas da simulação de vazão nas subbacias de cabeceira pode ser o reflexo de uma resposta mais sensível aos processos de propagação de vazão nos canais. Maiores investigações são necessárias para determinar as causas do mau desempenho nas subbacias de cabeceira.

A Figura 5.23 apresenta a distribuição dos fatores p e r de todas as estações, por estratégia e período. Deve-se procurar um equilíbrio entre os fatores p e r, de modo a capturar a maior parte dos dados observados com a menor incerteza possível. Há uma clara tendência para E2 e E4 apresentarem os menores fatores r, embora, acompanhados também por uma considerável diminuição nos valores do fator-p. Os maiores valores para o fator-p são exibidos por E1 e E3. Para a simulação mensal, a redução das incertezas em E5 é significativa em comparação à E1 e E3, capturando boa parte dos dados observados para pelo menos metade das estações. Porém, a simulação diária leva a um aumento significativo das incertezas (fator-r) em E5.

Os fatores p e r para cada estação, por período e estratégias, são apresentados no Apêndice IV. Os valores do fator-p(fator-r) variaram de 0,13(0,38) para a estação de Porto Santo Antônio (código 65970000) na estratégia E2, até 0,97(1,58) para a estação Quitandinha (código 65136550) na estratégia E3, ambos no período de 2006-2009. A estação Porto Santo Antônio (código 65970000) apresentou os menores valores para os fatores p e r em todas as estratégias analisadas, para ambos períodos analisados. Para ambos os períodos, o fator-r atingiu seus maiores valores na estação São Bento (código 65155000), chegando a 2,01 para E1 e E3 em 2009-2009.

O resultado da calibração com o SUFI-2 é um intervalo de valores para cada parâmetro. Com a finalidade de analisar todos os possíveis conjuntos de parâmetros dentro dos intervalos finais, foram construídos gráficos que apresentam a distribuição dos índices KGE, PBIAS e NS para todas as 500 simulações da validação. As figuras 5.22 a 5.33 apresentam os resultados dos índices KGE, PBIAS e NS calculados para as 500 simulações da última iteração da calibração e das

iterações de validação. Os resultados estão apresentados para todas as 23 estações fluviométricas e para o valor médio. A ordem das estações fluviométricas apresentadas nas figuras está de acordo com o código da ANA, ou seja, ordenadas de montante para jusante (da direita pra esquerda) em relação ao exutório. Analisando o desempenho de todas as 500 simulações que cobrem todo o intervalo de valores de cada parâmetro, os índices de desempenho variaram de acordo com a estratégia de calibração aplicada.

A Figura 5.25(Figura 5.26) indica os valores dos índices KGE(PBIAS) de todas as 500 simulações da última iteração de calibração. Para a maior parte das simulações e subbacias, os valores de PBIAS estão dentro da faixa dos $\pm 25\%$ para simulação diária e mensal, para ambos períodos de calibração e validação. A estação de Porto Santo Antônio (código: 65970000) exhibe um comportamento diferente para os índices PBIAS, com valores majoritariamente negativos. A curva de permanência desta estação ilustra a superestimativa de vazões (Figura 5.24). A razão para o comportamento diferenciado nesta localidade não ficou clara e necessita maiores investigações.

Para a função objetivo usada na calibração (KGE), o comportamento é relacionado à incerteza, isto é, estratégias com os maiores valores do fator-r apresentam maiores amplitudes dos valores de KGE. A simulação mensal apresenta valores positivos de KGE para todas estações, exceto São Bento (Figura 5.25 e Figura 5.28). São Bento exhibe maior amplitude dos valores de KGE, e até mesmo alguns valores negativos. Para a simulação diária, os valores de KGE são menores do que em escala mensal (Figura 5.31 e Figura 5.32). As subbacias de cabeceira, como São Bento, exibem baixos índices KGE em E3 e E5 na simulação diária do período 2002-2005 (Figura 5.32). Estes resultados sugerem que a simulação diária pode ser razoavelmente aceitável para o exutório e comportamento médio da bacia, porém, as subbacias de cabeceiras necessitam de mais calibrações para atingir desempenho satisfatório. Alguns dos parâmetros calibrados estão relacionados à fase de propagação nos canais, que podem ser significativamente diferentes para os trechos de cabeceira, podendo ser uma das causas para o desempenho insatisfatório nas subbacias de cabeceira.

A simulação mensal apresenta bons valores de NS para todas as estações, com valores positivos e acima de 0,50 predominando. Novamente, São Bento exhibe comportamento diferenciado e desempenho inferior, com índices aceitáveis somente em E4 (Figura 5.27 e Figura 5.30). O índice NS é significativamente inferior para a simulação diária (Figura 5.35 e Figura 5.36) e revela a falta de

capacidade do modelo calibrado mensalmente em simular os picos de vazão diária, especialmente para as subbacias de cabeceira. As estratégias E2 e E4 exibem NS satisfatórios para a maior parte das estações, mas as subbacias de cabeceira continuam sendo mal simuladas e impactam no valor médio.

Porto Santo Antônio exhibe bons valores de NS, apesar da considerável superestimativa revelada pelo PBIAS. Estes resultados ilustram a possibilidade de ocorrência de altos valores de NS apesar de grandes tendências de sub e superestimativas das vazões. Isso ocorre pois o índice KGE tende a procurar um equilíbrio global, preservando a distribuição de vazões e, portanto, fornecendo melhor concordância entre as curvas de permanência de vazões simuladas e observadas. O critério NS, entretanto, pode levar a simulações com grandes erros de volume e subestimativas da variabilidade da vazão (GUPTA et al., 2009; KLING; FUCHS; PAULIN, 2012).

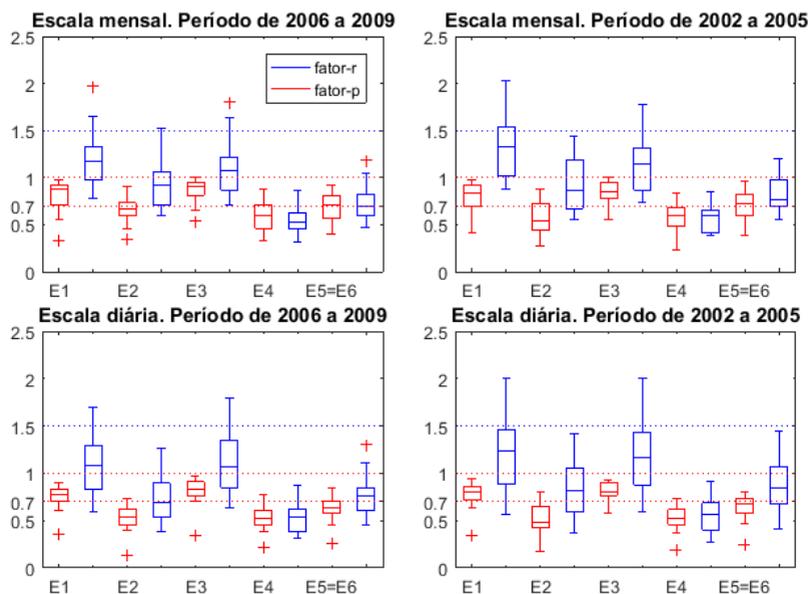


Figura 5.23: Distribuição dos fatores p e r de todas as estações, por estratégia e período.

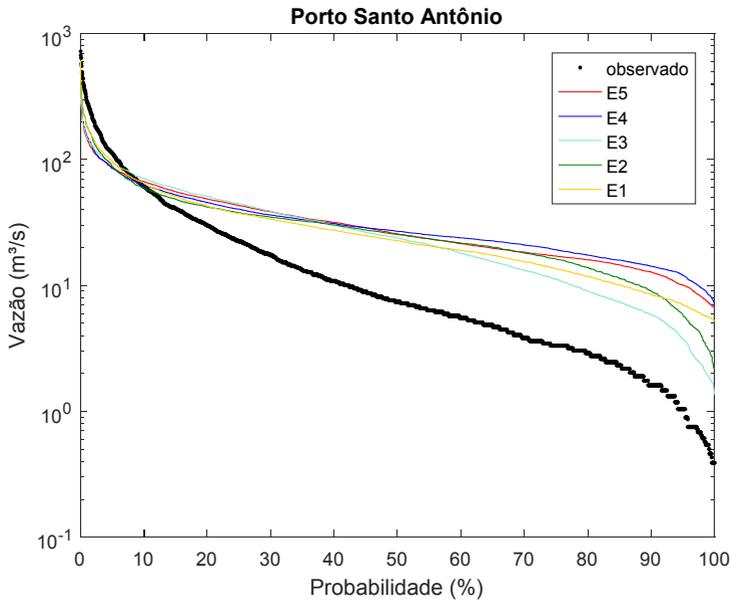


Figura 5.24: Curva de permanência das vazões diárias observadas e simuladas, para o período de 2002-2009, na estação Porto Santo Antônio.

Tabela 5.11: Indicadores de incertezas (fatores p e r) para a média e as quatro estações selecionadas, para as simulações mensais.

Simulação mensal											
Período		2006-2009					2002-2005				
Estratégia		E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5
Média	fator-p	0,81	0,65	0,86	0,60	0,68	0,79	0,57	0,84	0,57	0,71
	fator-r	1,20	0,92	1,08	0,53	0,73	1,34	0,92	1,15	0,57	0,82
	fator-r/fator-p	1,49	1,40	1,25	0,90	1,07	1,68	1,62	1,37	1,01	1,15
	max. fator-p	0,98	0,90	1,00	0,88	0,92	0,98	0,88	1,00	0,83	0,96
	min. fator-p	0,33	0,35	0,54	0,33	0,40	0,42	0,27	0,56	0,23	0,38
	Estações com fator-p >= 0.70	18	8	21	7	12	17	7	19	5	14
Beh_sim	396	279	487	440	500	302	101	471	270	497	
Exutório	fator-p	0,91	0,74	0,8	0,59	0,59	0,88	0,73	0,81	0,58	0,69
	fator-r	1,12	0,86	1,01	0,52	0,7	1,33	0,9	1,17	0,6	0,88
	fator-r/fator-p	1,23	1,16	1,26	0,88	1,19	1,51	1,23	1,44	1,03	1,28
	Beh_sim	470	394	498	478	500	388	237	492	416	500
União da Vitória	fator-p	0,96	0,63	0,96	0,73	0,52	0,85	0,56	0,85	0,65	0,63
	fator-r	1,33	1,01	1,17	0,6	0,77	1,43	1,01	1,23	0,64	0,84
	fator-r/fator-p	1,39	1,60	1,22	0,82	1,48	1,68	1,80	1,45	0,98	1,33
São Bento	fator-p	0,98	0,69	0,96	0,67	0,63	0,96	0,63	0,94	0,71	0,67
	fator-r	1,97	1,53	1,80	0,86	1,18	2,03	1,44	1,77	0,85	1,20
	fator-r/fator-p	2,01	2,22	1,88	1,28	1,87	2,11	2,29	1,88	1,20	1,79
Jangada	fator-p	0,88	0,60	0,90	0,71	0,75	0,85	0,44	0,85	0,63	0,54
	fator-r	1,32	0,93	1,08	0,58	0,72	1,34	0,85	1,12	0,6	0,76
	fator-r/fator-p	1,50	1,55	1,20	0,82	0,96	1,58	1,93	1,32	0,95	1,41

Tabela 5.12: Indicadores de incertezas (fatores p e r) para a média e as quatro estações selecionadas, para as simulações diárias.

Simulação diária											
Período		2006-2009					2002-2005				
Estratégia		E1	E2	E3	E4	E5	E1	E2	E3	E4	E5
Média	fator-p	0,75	0,53	0,81	0,53	0,64	0,79	0,51	0,80	0,53	0,65
	fator-r	1,09	0,74	1,14	0,52	0,76	1,23	0,85	1,22	0,57	0,88
	fator-r/fator-p	1,44	1,40	1,41	0,98	1,20	1,56	1,66	1,51	1,08	1,35
	max. fator-p	0,90	0,73	0,97	0,78	0,84	0,94	0,81	0,93	0,74	0,81
	min. fator-p	0,36	0,13	0,34	0,21	0,26	0,34	0,17	0,58	0,19	0,25
	Estações com fator-p >= 0.70	18	2	22	2	8	20	3	20	3	8
Beh_sim	18	3	108	473	232	246	142	185	356	224	
Exutório	fator-p	0,88	0,68	0,93	0,49	0,50	0,82	0,68	0,73	0,48	0,56
	fator-r	1,35	0,76	1,44	0,55	0,81	1,30	0,88	1,29	0,62	0,96
	fator-r/fator-p	1,53	1,12	1,55	1,12	1,62	1,59	1,29	1,77	1,29	1,71
	Beh_sim	81	49	215	490	196	279	252	174	400	112
União da Vitória	fator-p	0,77	0,48	0,83	0,52	0,58	0,86	0,54	0,82	0,54	0,65
	fator-r	1,40	0,93	1,43	0,65	0,91	1,45	1,03	1,44	0,70	1,01
	fator-r/fator-p	1,82	1,94	1,72	1,25	1,57	1,69	1,91	1,76	1,30	1,55
São Bento	fator-p	0,90	0,63	0,96	0,54	0,70	0,94	0,55	0,91	0,61	0,74
	fator-r	1,70	1,26	1,80	0,87	1,30	2,01	1,42	2,01	0,92	1,45
	fator-r/fator-p	1,89	2,00	1,88	1,61	1,86	2,14	2,58	2,21	1,51	1,96
Jangada	fator-p	0,74	0,51	0,75	0,58	0,66	0,80	0,34	0,91	0,46	0,58
	fator-r	0,98	0,65	0,94	0,48	0,67	1,16	0,73	1,07	0,52	0,76
	fator-r/fator-p	1,32	1,27	1,25	0,83	1,02	1,45	2,15	1,18	1,13	1,31

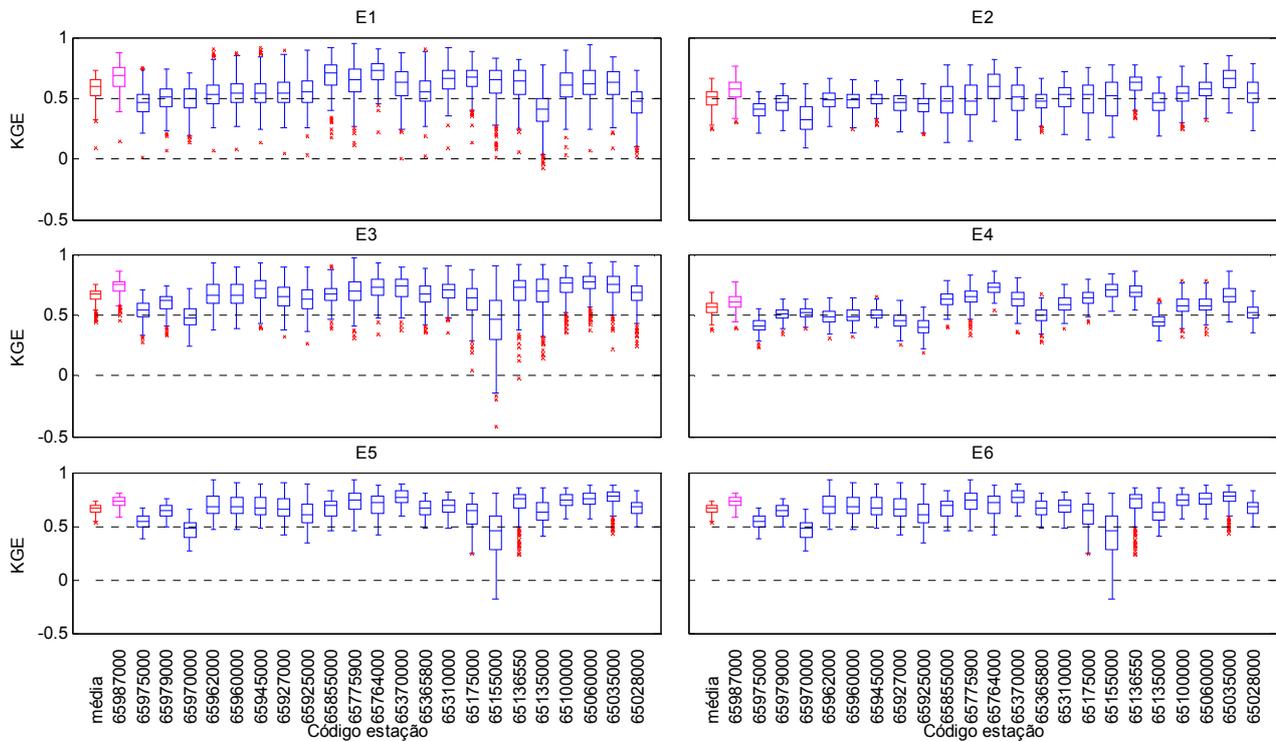


Figura 5.25: Índice KGE para a última iteração da calibração (2006-2009, escala mensal), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

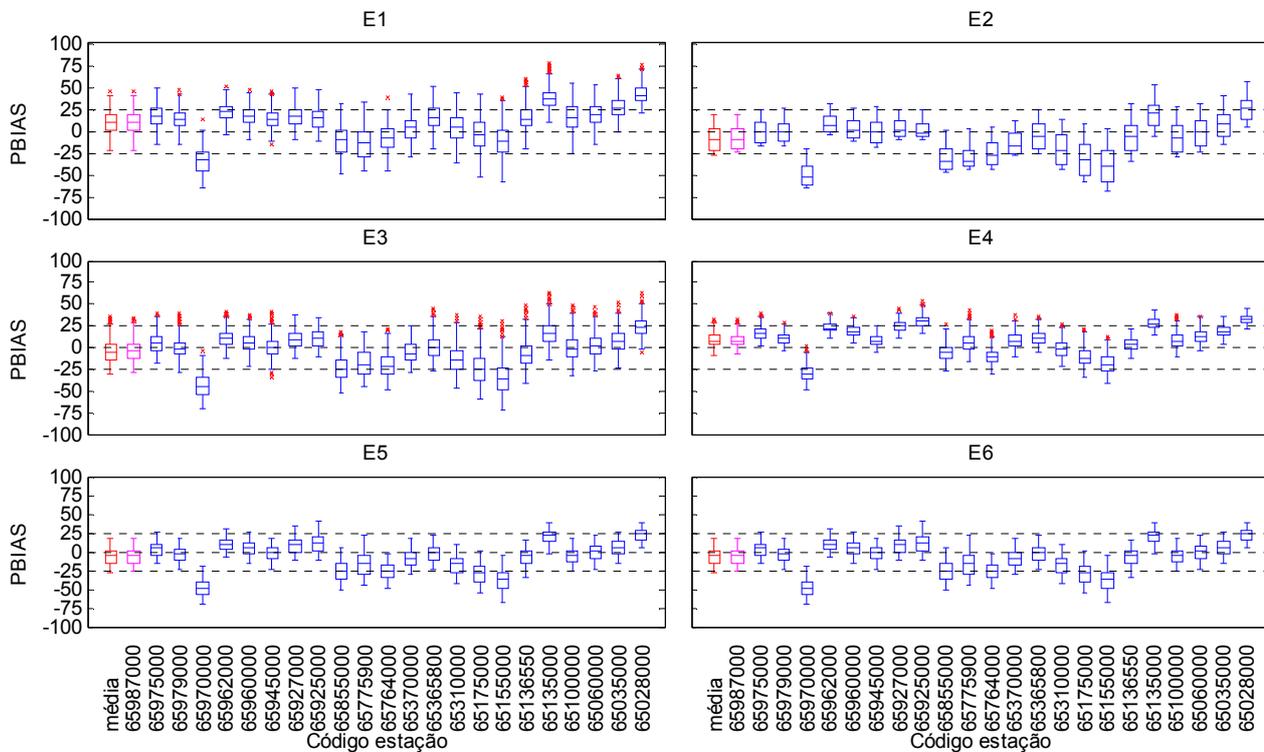


Figura 5.26: Índice PBIAS para a última iteração da calibração (2006-2009, escala mensal), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

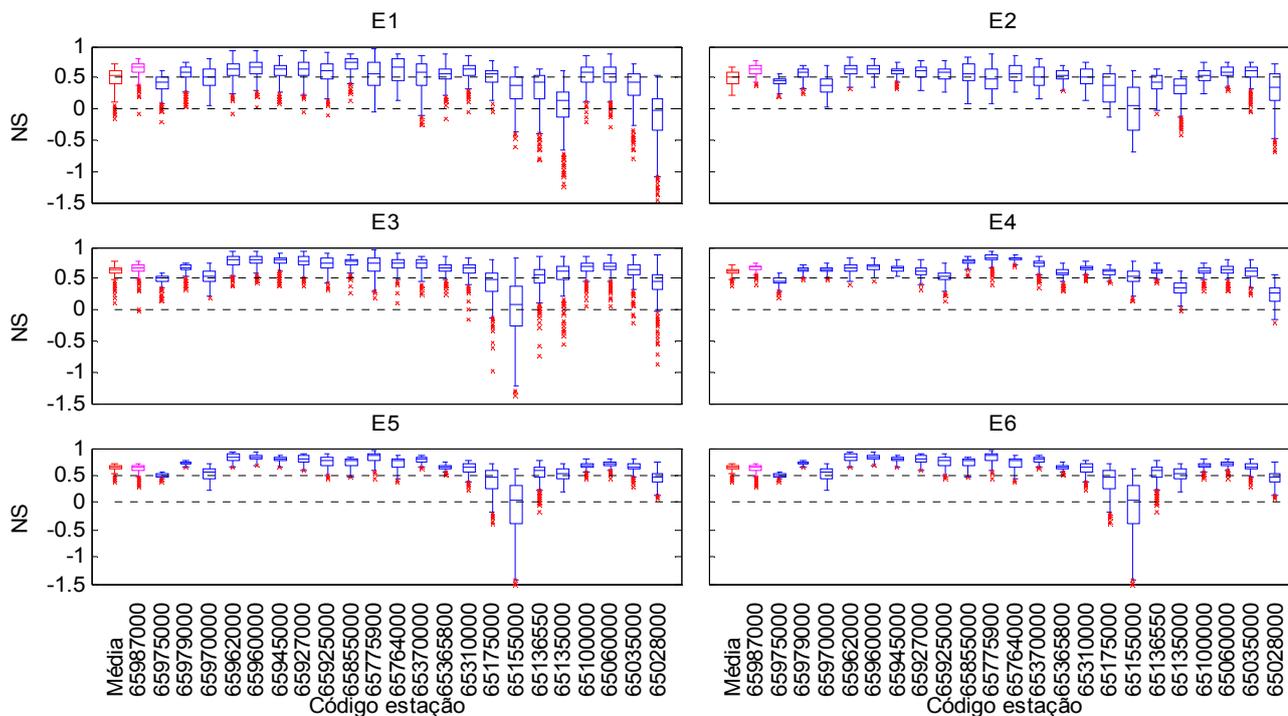


Figura 5.27: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a última iteração da calibração (2006-2009, escala mensal), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

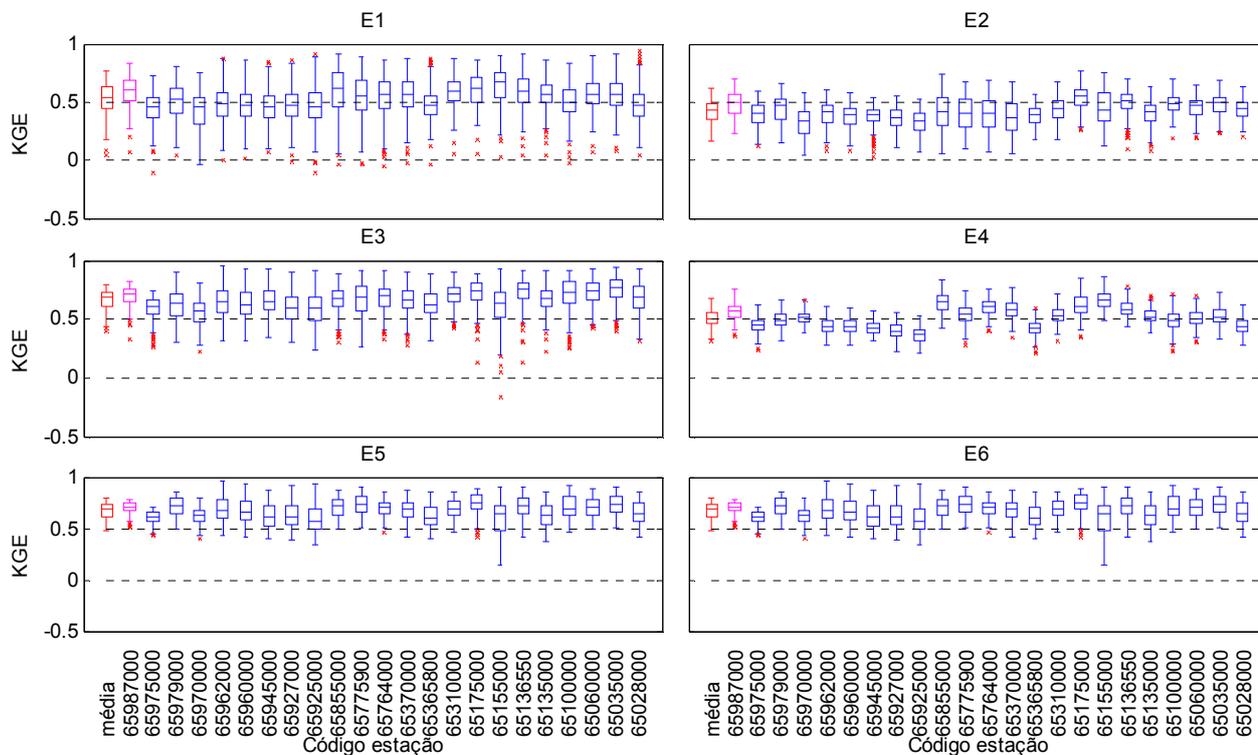


Figura 5.28: Índice KGE para a validação mensal (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio

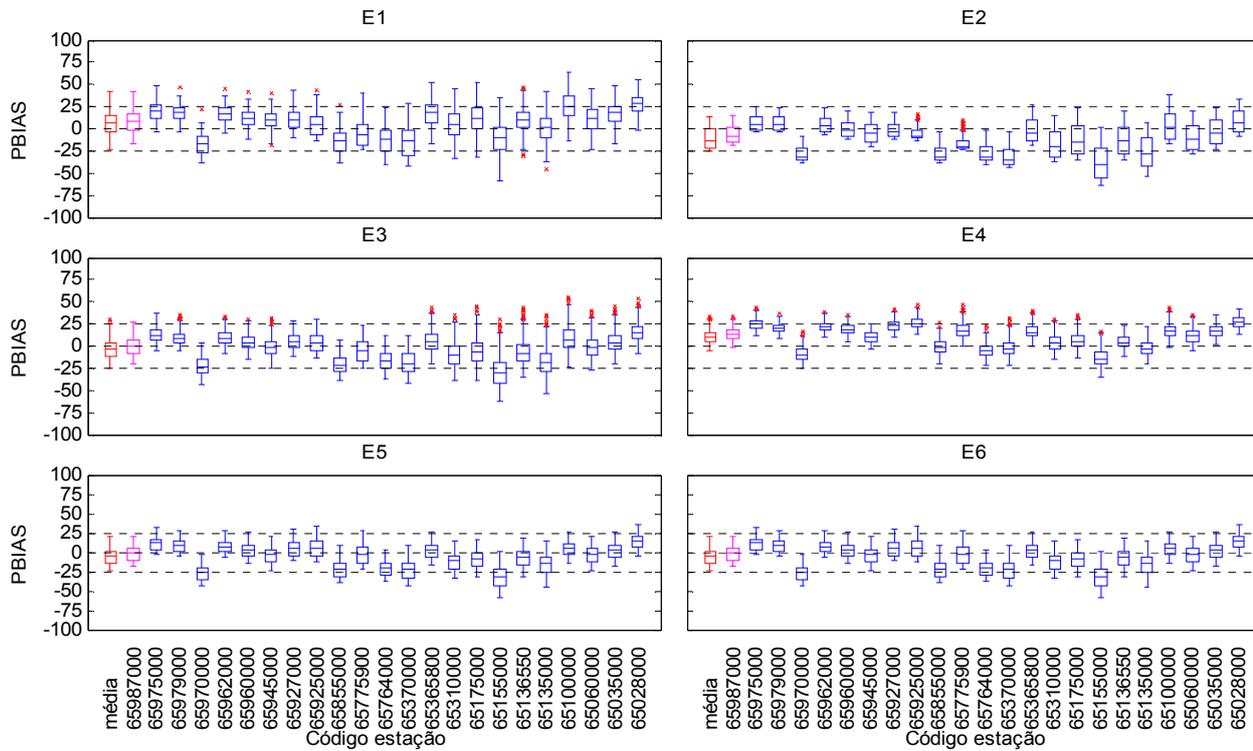


Figura 5.29: Índice PBIAS para a validação mensal (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

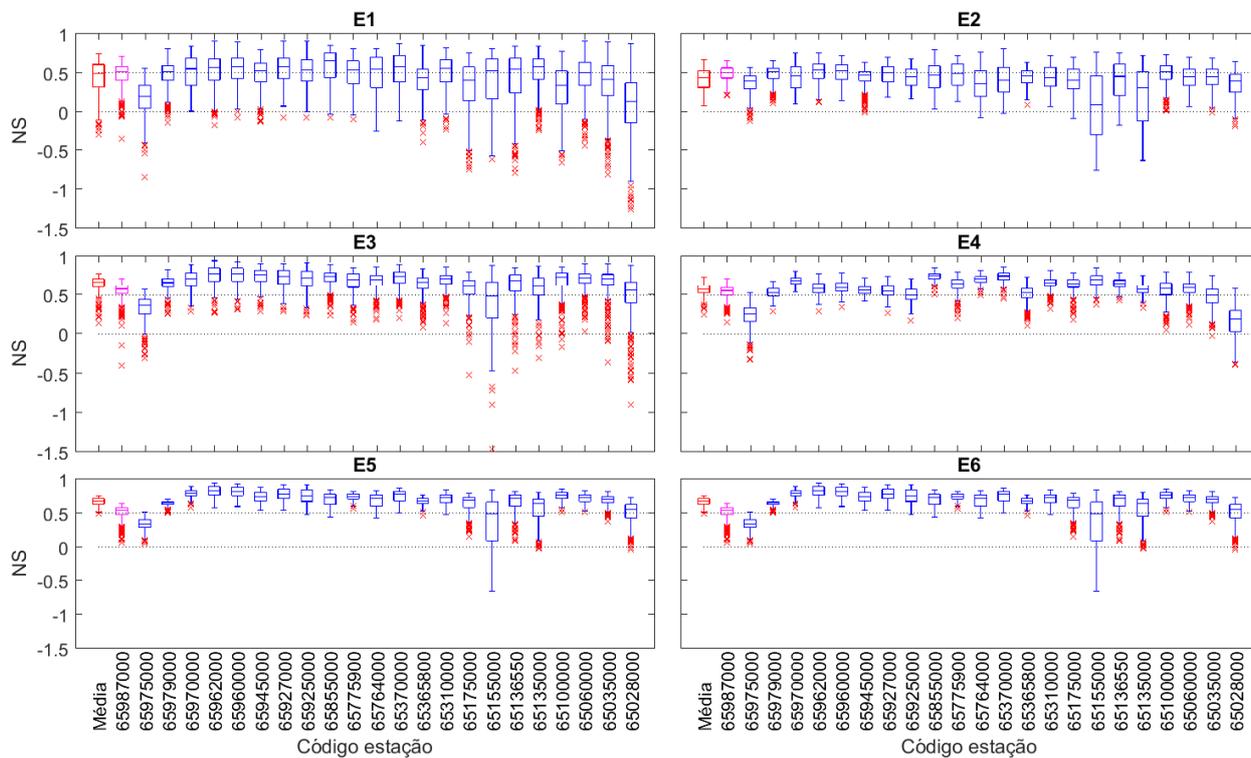


Figura 5.30: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a validação mensal (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

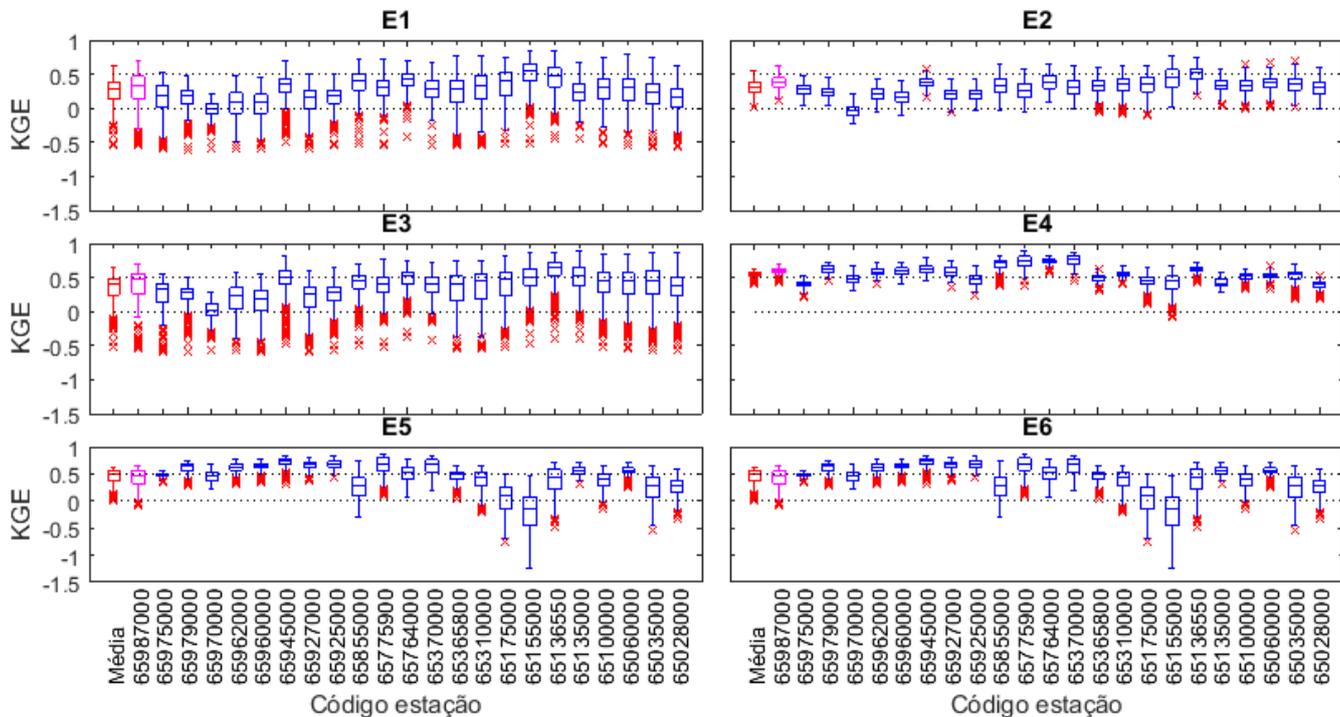


Figura 5.31: Índice KGE para a validação diária (2006-2009), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

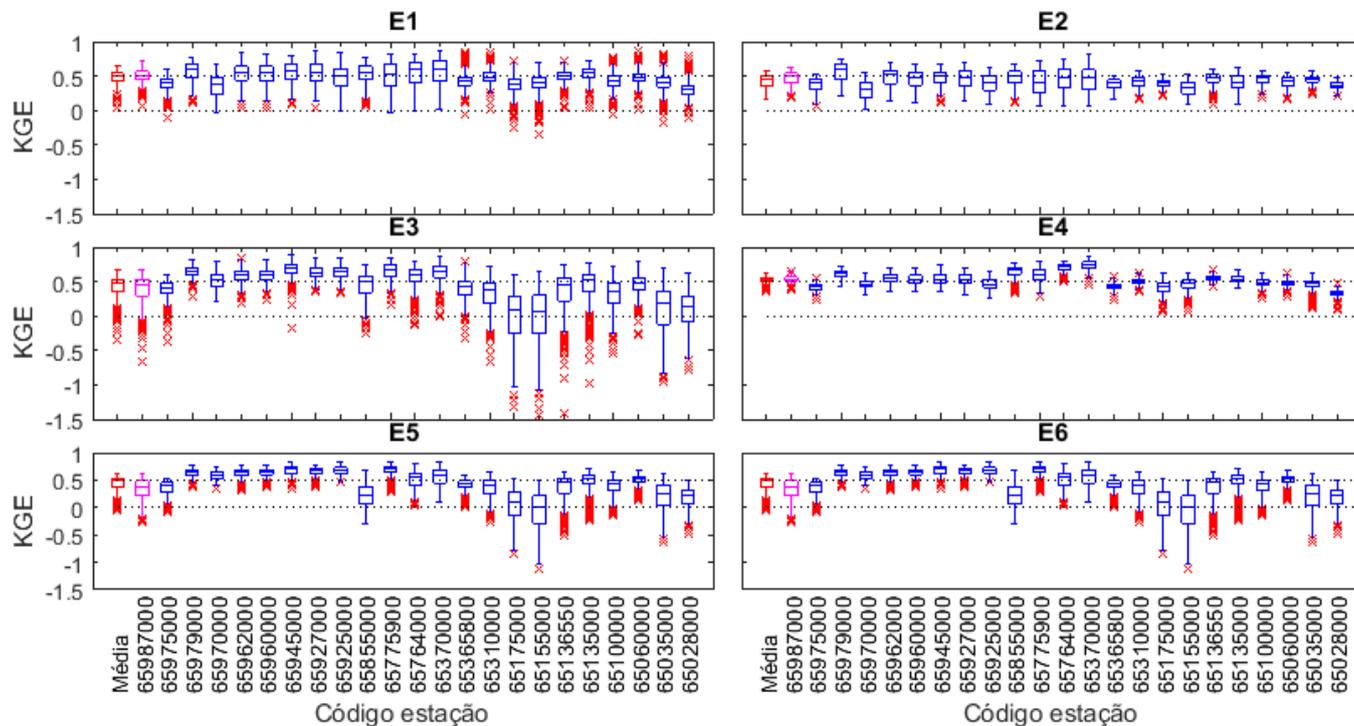


Figura 5.32:Índice KGE para a validação diária (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

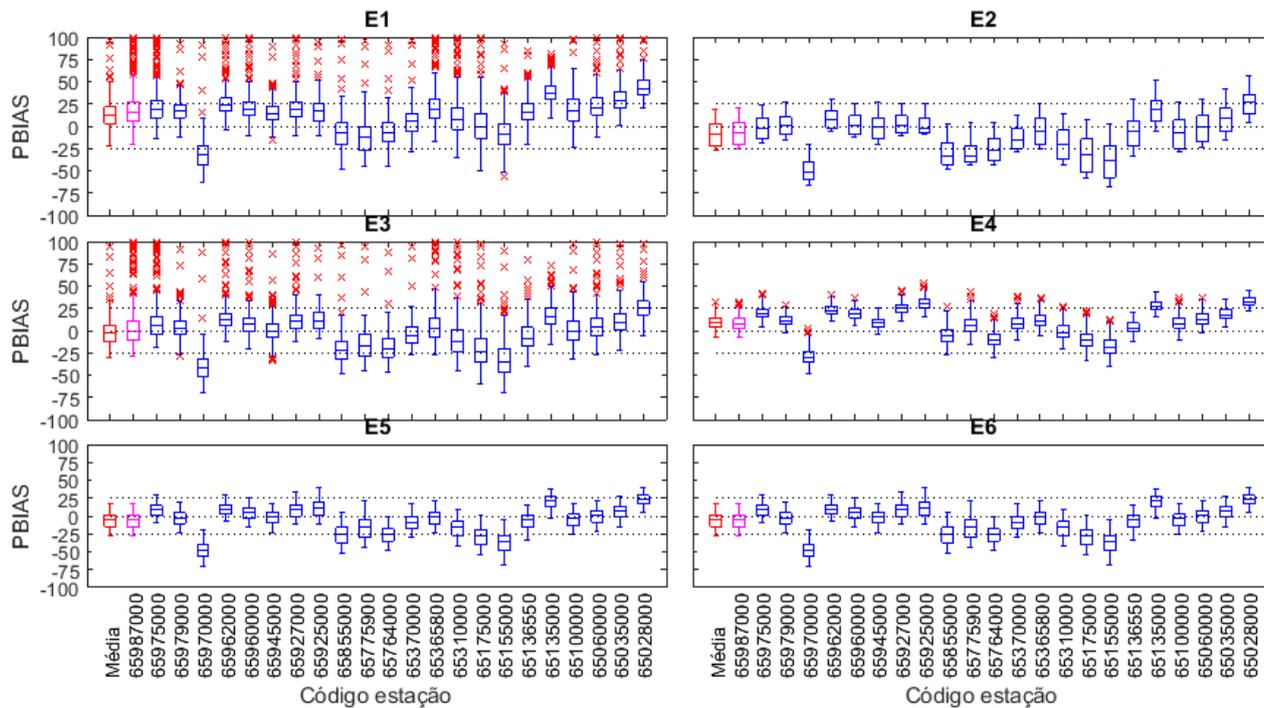


Figura 5.33:Índice PBIAS para a validação diária (2006-2009), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

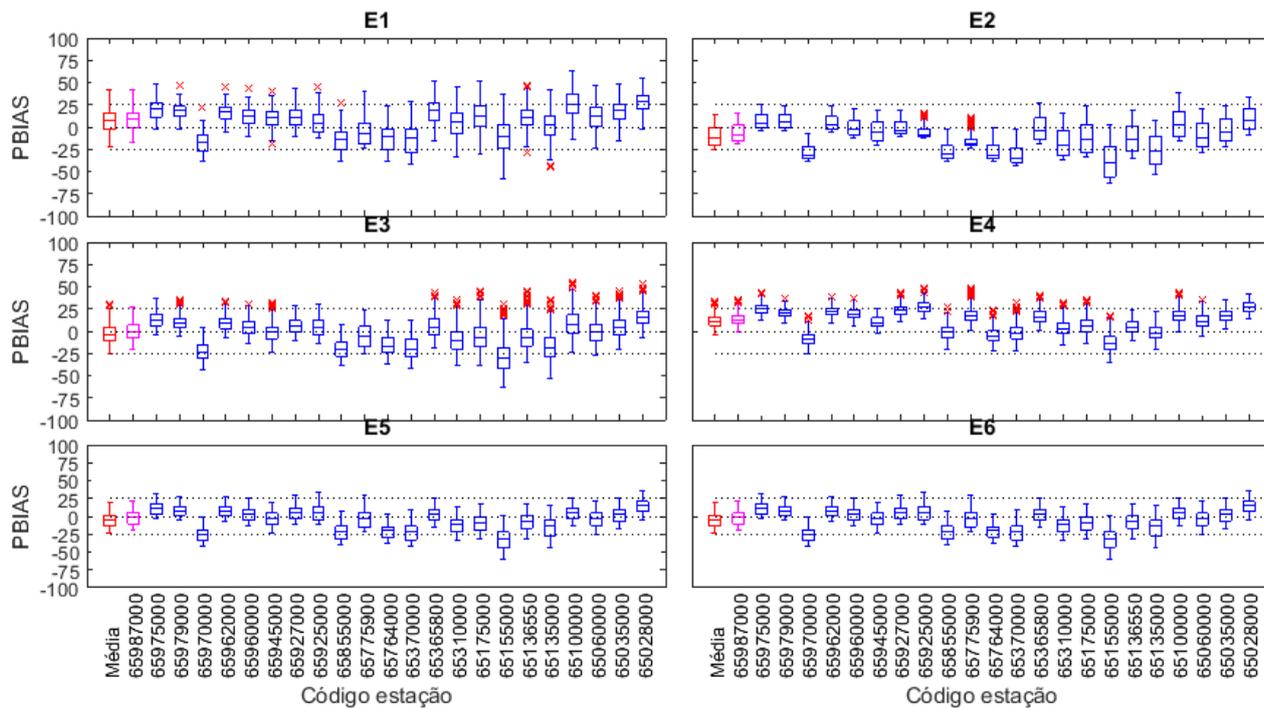


Figura 5.34: Índice PBIAS para a validação diária (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

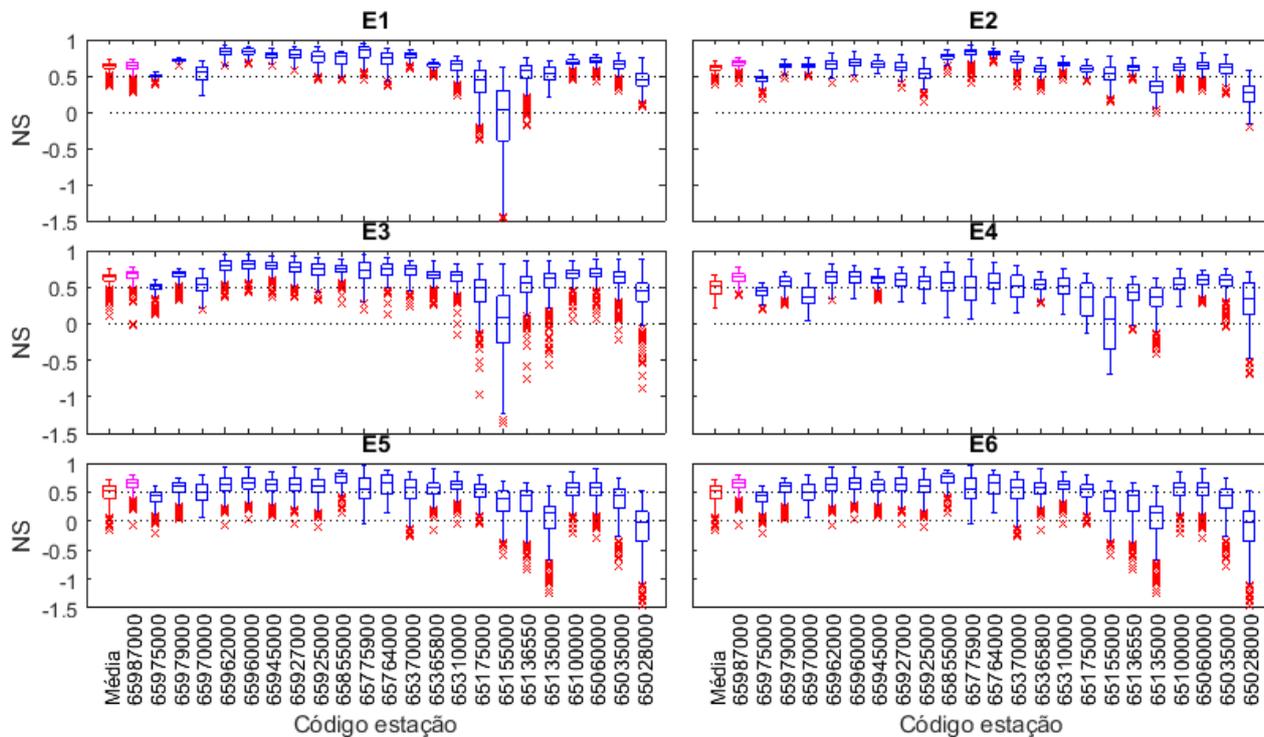


Figura 5.35: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a validação diária (2006-2009), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

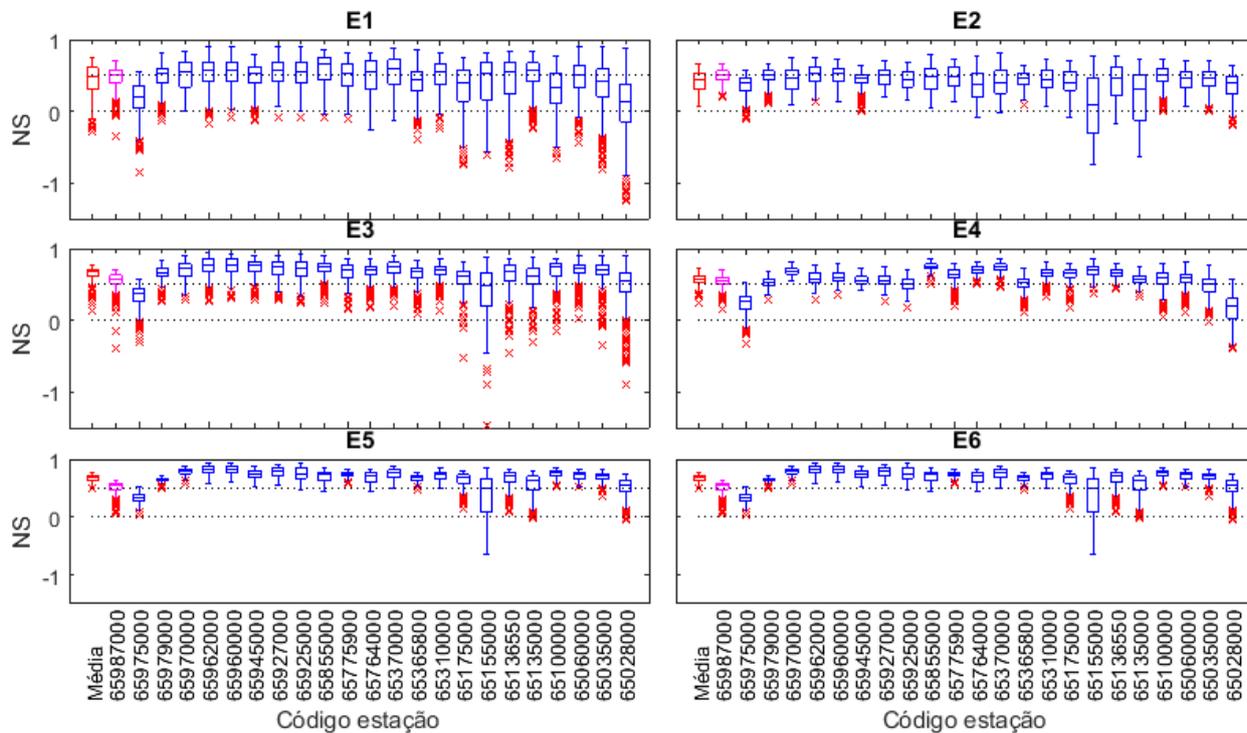


Figura 5.36: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a validação diária (2002-2005), para cada estação fluviométrica e o valor médio.

Sensibilidade relativa dos parâmetros calibrados

A sensibilidade relativa dos parâmetros calibrados foi avaliada na última iteração da calibração, em relação ao desempenho médio de todas as estações de medição de vazão disponíveis na bacia (Figura 5.38). As estratégias E5 e E6 possuem o mesmo intervalo calibrado de parâmetros. A estratégia E5(=E6) é a estratégia a apresentar menos parâmetros sensíveis. A menor sensibilidade dos parâmetros, justifica os baixos valores do fator-r apresentados nas estimativas de vazão para os períodos de calibração e validação. A calibração convencional, estratégia E1, é a que apresenta mais parâmetros sensíveis, e também as maiores incertezas nas estimativas de vazão.

O parâmetro SOL_AWC se torna mais sensível nas estratégias que incluem a evapotranspiração na calibração. Este comportamento é esperado, pois o parâmetro define a quantidade de água armazenada no solo, importante regulador da evapotranspiração. Os parâmetros CH_N1, SOL_AWC, SLSOIL e ALPHA_BF apresentam-se mais sensíveis nas estratégias E4 e E5(=E6), com a utilização da evapotranspiração na função objetivo, do que na estratégia E3. Com exceção do parâmetro CH_N1 (coeficiente de Manning para canais tributários) os demais parâmetros governam processos subsuperficiais. As estratégias de calibração E5 e E6 levam a diminuição da sensibilidade dos parâmetros DEP_IMP, CN2 e GW_DELAY em comparação à todas as demais estratégias. DEP_IMP e GW_DELAY são parâmetros relacionados ao aquífero livre, e seu comportamento em E5 (=E6) contrasta com o esperado. Comparando-se E2 e E6 com E1, somente SOL_AWC e LAT_TTIME passam a apresentar maior sensibilidade relativa.

Os resultados da sensibilidade relativa dos parâmetros para a estação de São Bento diferem da sensibilidade avaliada em relação ao exutório da bacia (KGE), utilizado nas estratégias E1, E2 e E6, e ao desempenho médio de todas as estações de vazão disponíveis na bacia (KGE), utilizado nas estratégias E3, E4 e E5(=E6). A Figura 5.37 apresenta as sensibilidades relativas da estação de São Bento comparada ao exutório e à média de todas as estações, para o período de calibração (2006-2009) em escala mensal.

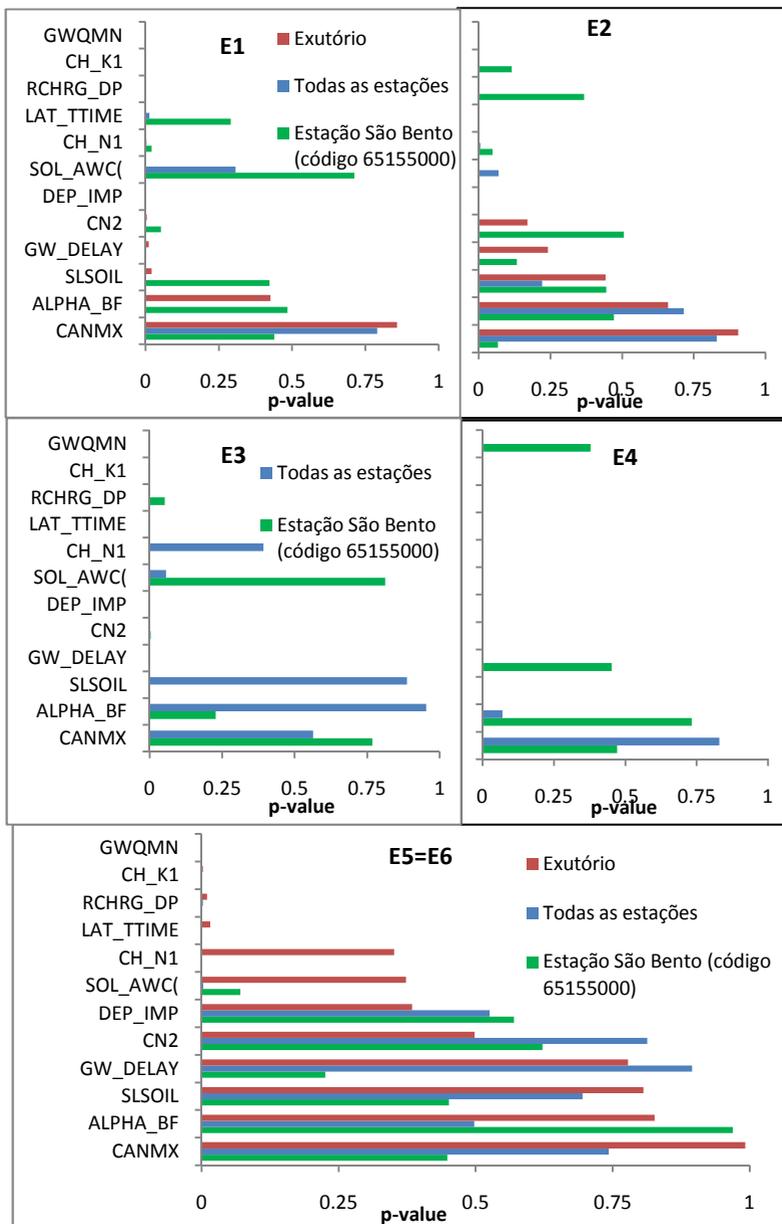


Figura 5.37: Sensibilidade relativa dos parâmetros para a última iteração da calibração, para a estação São Bento em comparação ao exutório e à média de todas as estações.

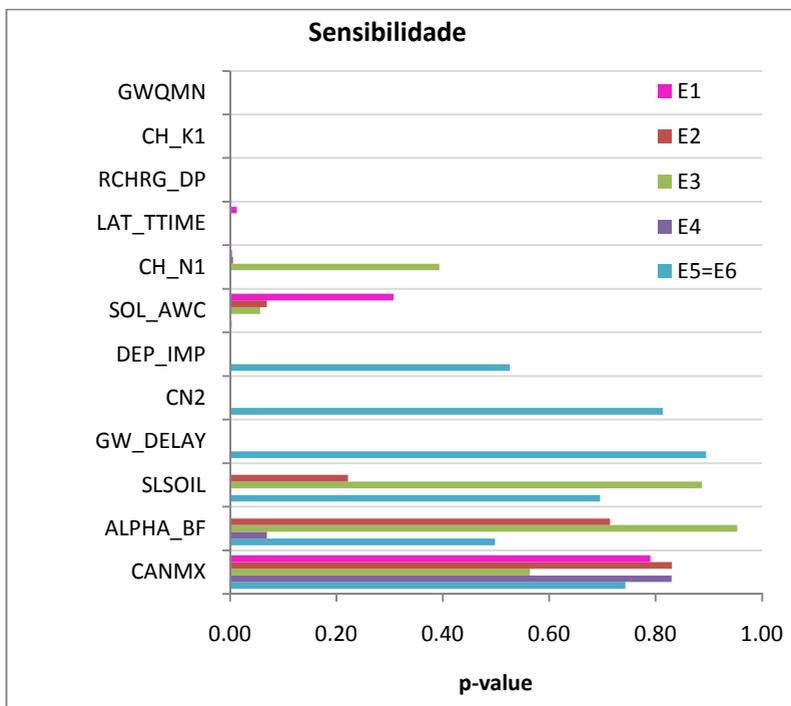


Figura 5.38: Sensibilidade dos parâmetros na iteração final, em relação à todas as estações de vazão da bacia (KGE).

Incertezas dos parâmetros

A normalização dos intervalos finais de calibração permite comparar as incertezas associadas aos parâmetros, entre as diferentes estratégias e entre os diferentes parâmetros. Os limites superior e inferior de cada parâmetro calibrado foram normalizados e o intervalo foi calculado para cada parâmetro. A Tabela 5.14 apresenta os intervalos finais calibrados de cada estratégia, os intervalos normalizados estão apresentados na Tabela 5.13 e Figura 5.39 e a sensibilidade dos parâmetros encontra-se na Figura 5.38

O intervalo médio dos parâmetros normalizados, para cada uma das estratégias, variou de 36 % (E2) a 40 % (E4), não apresentando variabilidade significativa entre as estratégias (Figura 5.39 e Tabela 5.14). O intervalo dos parâmetros foi menor para E1 e E2, que apresentaram os maiores valores para a razão fator-r/fator-p, e maior para E3, E4 e E5, que apresentaram valores menores para fator-r/fator-p.

A pouca variabilidade dos intervalos dos parâmetros entre as diferentes estratégias impede o estabelecimento de uma correlação clara com a razão fator-r/fator-p.

Intervalos menores sugerem menos incerteza relacionada ao parâmetro. Entre os diferentes parâmetros, GW_DELAY e LAT_TTIME apresentaram o menor intervalo final, 26%, nas estratégias E3 e E5, respectivamente. Entre todas as estratégias, GW_DELAY chegou a 35% e LAT_TTIME a 36%. Ambos parâmetros controlam o fluxo de água no solo. GW_DELAY representa o tempo de atraso, em dias, entre o momento em que a água existe no perfil de solo e o momento em que a água contribui para recarga do aquífero raso. LAT_TTIME representa o tempo de duração do escoamento lateral, também em dias.

Alguns parâmetros como SOL_AWC e RCHRG_DP exibem intervalos finais bastante similares para todas as estratégias. SOL_AWC representa a quantidade de água disponível no solo e os valores foram calibrados em relação aos valores originais estabelecidos no banco de dados de solo. Todas as estratégias de calibração apresentaram resultados indicando aumento no valor de SOL_AWC em relação ao valor original. Tal fato pode sugerir subestimativas nos valores associados ao banco de dados, ou mecanismo de compensação de erros associado à quantidade de água disponível no solo.

RCHRG_DP por sua vez representa a fração de água percolada da zona de raízes para o aquífero profundo. Os valores calibrados apresentaram-se inferiores à 0,52, sugerindo que menos de 50% da água percola da zona de raízes para o aquífero profundo.

O parâmetro CN2, apesar de sensível nas iterações iniciais, apresentou o maior intervalo final, com 60 % na estratégia E4. A sensibilidade dos parâmetros não apresentou correlação significativa (a um nível de confiança de 95%) com os intervalos finais de calibração normalizados.

Tabela 5.13: Intervalos finais de calibração normalizados.

Parâmetro	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	Média
r_CN2.mgt	56	48	35	60	37	47
r_SOL_AWC().sol	35	45	35	38	42	39
v_ALPHA_BF.gw	37	33	40	59	36	41
v_GW_DELAY.gw	30	34	26	31	35	31
v_LAT_TTIME.hru	34	36	34	31	26	32
v_CH_K1.sub	44	29	45	35	49	40
v_CH_N1.sub	30	29	46	46	45	39
v_RCHRG_DP.gw	28	29	43	41	45	37
v_CANMX.hru	32	29	52	34	33	36
v_DEP_IMP.hru	51	54	49	34	28	43
v_GWQMN.gw	35	38	43	36	56	41
v_SLSOIL.hru	32	33	34	38	33	34
Média	37	36	40	40	39	38

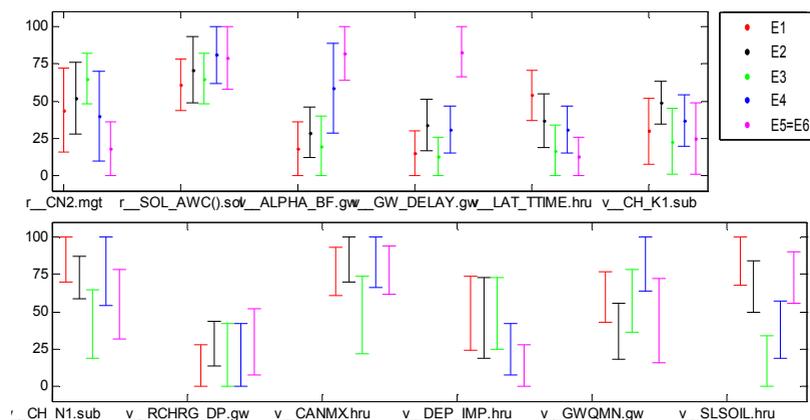


Figura 5.39: Valores normalizados dos intervalos finais calibrados, para cada parâmetro e estratégia.

Tabela 5.14: Intervalos finais dos parâmetros calibrados de acordo com cada estratégia.

Parâmetro	E1	E2	E3	E4	E5(=E6)
CN2	-0,2__0,13	-0,13__0,16	-0,01__0,2	-0,24__0,12	-0,3__-0,08
SOL_AWC	-0,04__0,17	-0,01__0,26	-0,01__0,2	0,07__0,3	0,05__0,3
ALPHA_BF	0__0,37	0,13__0,46	0__0,4	0,3__0,89	0,64__1
GW_DELAY	0__150	85__255	0__132	78__235	327__500
LAT_TTIME	65,5__127,5	34,7__99,2	0__62	28__83,9	0__46,5
CH_K1	23__155	106__191	2__135	57__162	0__147
CH_N1	0,35__0,5	0,3__0,44	0,1__0,33	0,28__0,5	0,17__0,39
RCHRG_DP	0__0,28	0,15__0,44	0__0,43	0__0,41	0,08__0,52
CANMX	6,13__9,36	7,09__10	2,26__7,42	6,64__10	6,11__9,41
DEP_IMP	1433__4478	1182__4394	1456__4371	496__2520	0__1682
GWQMN	2120__3857	927__2815	1785__3929	3223__5000	810__3604
SLSOIL	101__150	75__125	0__51	28__85	84__134

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo o estudo do impacto de diferentes estratégias de calibração do modelo SWAT nas estimativas de vazão do modelo. As estratégias de calibração analisadas consideraram o uso de estimativas de evapotranspiração derivadas de produtos de sensoriamento remoto e também o impacto do uso de múltiplas estações fluviométricas, em comparação à calibração convencional (somente com dados de vazão no exutório da bacia). As incertezas e o desempenho das estimativas de vazão do modelo foram analisadas para o exutório e subbacias, e a área de estudo foi a bacia do rio Iguaçu.

O uso da interpolação espacial dos dados de precipitação na bacia do rio Iguaçu melhorou o desempenho da simulação de vazão para o exutório e subbacias, em ambas escalas temporais (mensal e diária), com diferenças significativas para determinadas localidades.

As estimativas de evapotranspiração do modelo SWAT foram consideravelmente inferiores aos valores estimados através do METRIC e essa tendência de subestimativa é acentuada nos meses mais quentes, em que o volume evapotranspirado é maior.

Considerando as diferentes estratégias de calibração analisadas, a calibração convencional (E1) apresentou as maiores incertezas nas estimativas de vazão, mas alcançou bom desempenho na calibração e validações, para ambos o exutório e subbacias, incluindo a validação em escala diária.

O uso de múltiplas estações fluviométricas (*multi-site*) e/ou estimativas evapotranspiração em conjunto com as observações de vazão (multi-variável) nas estratégias de calibração do modelo SWAT, na bacia do rio Iguaçu, diminuíram as incertezas envolvidas nas estimativas de vazão, quando comparado à estratégia convencional de calibração (somente registros de vazão do exutório da bacia). O desempenho do modelo na simulação de vazão, porém, não é significativamente aperfeiçoado com o uso das calibrações *multi-site* e multi-variável. O resultado das estratégias de calibração multi-variável depende da ordem em que as variáveis são incluídas nas iterações. As diferentes possibilidades de estratégias de calibração não foram esgotadas e recomenda-se a realização de estudos avaliando estratégias de calibração utilizando somente dados de evapotranspiração, bem como a construção de uma estratégia de calibração capaz de agregar informações de evapotranspiração mensal e vazão diária.

É possível que a limitada capacidade das estratégias *multi-site* e multi-variável em aprimorar o desempenho de simulação da vazão do modelo seja devido às incertezas das estimativas de evapotranspiração derivadas do METRIC e das incertezas e erros de medição dos registros de vazão observada.

A bacia do rio Iguaçu possui um grande número de reservatórios de estações hidroelétricas, principalmente no rio Iguaçu. Devido à presença destes reservatórios, algumas estações fluviométricas, como o exutório, apresentam registros de vazão que refletem a operação destes reservatórios, e não o comportamento natural dos rios. Em escala diária esta influência é significativa. Sugere-se a utilização de séries de vazão naturais (ONS, 2007, 2016) para calibração e validação do modelo, especialmente em escala diária. Séries de vazão naturais são produzidas pela ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, em escalas mensais e diárias, para determinados reservatórios de hidroelétricas do território brasileiros.

Para a transferência de parâmetros entre escalas temporais (validação diária) todas as estratégias de calibração analisadas levaram a resultados razoavelmente satisfatórios considerando as incertezas (fator-p e fator-r) e o desempenho da função objetivo na simulação de vazão ($KGE \geq -0,50$). Com relação à simulação dos picos de vazão e o coeficiente de Nash-Sutcliffe, parte das localidades e o valor médio apresentaram desempenho insatisfatório nas simulações diárias. As subbacias localizadas na cabeceira da bacia do rio Iguaçu, entretanto, obtiveram resultados de validação diária inferiores à média, e podem necessitar calibração diferenciada para atingir desempenho aceitável para a simulação de vazão.

Recomenda-se o desenvolvimento de estudos futuros, incluindo o uso de diferentes produtos de sensoriamento remoto (umidade do solo, por exemplo), bem como análises referentes à diferentes variáveis de saída do modelo. A calibração do modelo em escala diária, para comparação com a transferência dos parâmetros, pode fornecer maiores informações em relação a qualidade desta abordagem. Similarmente, sugere-se a calibração do modelo com diferentes funções objetivo (NS, por exemplo) para avaliação da transferência temporal de parâmetros. Recomenda-se, ainda, a realização de análises de incertezas dos dados de entrada do modelo, principalmente precipitação. Por fim, a avaliação da transferência de parâmetros entre diferentes escalas espaciais também constitui análise de interesse no estudo da modelagem hidrológica, especialmente, para os usuários do SWAT.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C. Calibration of Hydrologic Models: When is a Model Calibrated? **MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation**, p. 2449–2455, 2005.

ABBASPOUR, K. C. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, , 2015.

ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340, 2004.

ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S.; YANG, J. SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT. **The fourth International SWAT conference**, p. 1596–1602, 2007.

ABBOTT, M. B.; REFSGAARD, J. C. **Distributed Hydrological Modelling**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996. v. 22

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998. Disponível em: <<http://extension.uidaho.edu/kimberly/files/2013/04/fao56.pdf>>

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. Satellite-Based Evapotranspiration by Energy Balance for Western States Water Management. Impacts of Global Climate Change. **Anais**:Reston, VA: American Society of Civil Engineers, jul. 2005 Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40792\(173\)556](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40792(173)556)>

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration ,, METRIC ... — Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, n. August, p. 395–406, 2007.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 380–394, ago. 2007.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.;

BASTIAANSEN, W. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and Users Manual - Idaho Implementation. v. Version 1., p. 1–98, 2002.

AMATYA, P. M.; MA, Y.; HAN, C.; WANG, B.; DEVKOTA, L. P. Estimation of net radiation flux distribution on the southern slopes of the central Himalayas using MODIS data. **Atmospheric Research**, v. 154, p. 146–154, 2015.

ANDRZEJ URBANSKI, J.; WOCHNA, A.; BUBAK, I.; GRZYBOWSKI, W.; LUKAWSKA-MATUSZEWSKA, K.; ŁĄCKA, M.; ŚLIWIŃSKA, S.; WOJTASIEWICZ, B.; ZAJĄCZKOWSKI, M. Application of Landsat 8 imagery to regional-scale assessment of lake water quality. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 51, p. 28–36, set. 2016.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, v. 142, n. 1–4, p. 47–69, 1993.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. **Texas Water Resources Institute, TR-439**, 2012a.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSVEN, A. VAN; VANLIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012b.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, 1998. Disponivel em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>>

AWAN, U. K.; ISMAEEL, A. A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1368–1382, 2014.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art**. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes

in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1–2, p. 87–100, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L.; OTHERS. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. February, p. 2, 2005.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, n. 1–4, p. 198–212, 1998a.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MOLDEN, D. J.; MAKIN, I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications. **Agricultural Water Management**, v. 46, n. 2, p. 137–155, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 213–229, 1998b.

BETRIE, G. D.; MOHAMED, Y. A.; VAN GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 3, p. 807–818, 2011.

BEVEN, K. A manifesto for the equifinality thesis. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1–2, p. 18–36, 2006.

BEVEN, K. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. 2. ed. Lancaster University, UK: JohnWiley & Sons, 2012a.

BEVEN, K. **Rainfall-Runoff Modelling**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012b.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological Processes**, v. 6, n. January 2016, p. 279–298, 1992.

BEVEN, K. J. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. **Advances in Water Resources**, v. 16, p. 41–51, 1993.

BHUVANESWARI, K.; GEETHALAKSHMI, V.; LAKSHMANAN, A.; SRINIVASAN, R.; SEKHAR, N. U. The Impact of El Niño/Southern

oscillation on hydrology and rice productivity in the cauvery basin, India: Application of the soil and water assessment tool. **Weather and Climate Extremes**, v. 2, p. 39–47, 2013.

BRACMORT, K. S.; ARABI, M.; FRANKENBERGER, J. R.; ENGEL, B. A.; ARNOLD, J. G. Modeling Long-Term Water Quality Impact of Structural BMPs. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 49, n. 2, p. 367–374, 2006.

BRESSIANI, D. DE A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the Atmosphere**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982.

BRUTSAERT, W. **Hydrology: An Introduction**. Cambridge: cambridge university press, 2005.

CAO, W.; BOWDEN, W. B.; DAVIE, T.; FENEMOR, A. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 5, p. 1057–1073, 2006.

CRISTIANO, P. M.; CAMPANELLO, P. I.; BUCCI, S. J.; RODRIGUEZ, S. A.; LEZCANO, O. A.; SCHOLZ, F. G.; MADANES, N.; DI FRANCESCANTONIO, D.; CARRASCO, L. O.; ZHANG, Y.-J.; GOLDSTEIN, G. Evapotranspiration of subtropical forests and tree plantations: A comparative analysis at different temporal and spatial scales. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 203, p. 96–106, 2015.

DAGGUPATI, P.; YEN, H.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; KEITZER, C. S.; SOWA, S. P. Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 26, p. 5307–5320, 30 dez. 2015.

EMBRAPA (ED.). Sistema brasileiro de classificação de solos **Rio de Janeiro: Embrapa Solos** Rio de Janeiro, 2006.

- GETIRANA, A. C. V. Integrating spatial altimetry data into the automatic calibration of hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 387, n. 3–4, p. 244–255, 2010.
- GITHUI, F.; SELLE, B.; THAYALAKUMARAN, T. Recharge estimation using remotely sensed evapotranspiration in an irrigated catchment in southeast Australia. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 9, p. 1379–1389, 30 abr. 2012.
- GREEN, C.; VANGRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 4, p. 422–434, abr. 2008.
- 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. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009.
- HER, Y.; CHAUBEY, I. Impact of the numbers of observations and calibration parameters on equifinality, model performance, and output and parameter uncertainty. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 19, p. 4220–4237, 2015.
- HOLZMAN, M. E.; RIVAS, R.; PICCOLO, M. C. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 28, n. 1, p. 181–192, 2014.
- IMMERZEEL, W. W.; DROOGERS, P. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 3–4, p. 411–424, 2008.
- IMMERZEEL, W. W.; GAUR, A.; ZWART, S. J. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 1, p. 11–24, jan. 2008.
- JUNIOR, P. P. A.; MAUAD, F. F. Simulação dos Impactos das Mudanças Climáticas na Vazão da Bacia do Ribeirão do Feijão – SP. **RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, p. 741–751, 2015.
- KLEMESŠ, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13–24, 1986.
- KLING, H.; FUCHS, M.; PAULIN, M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 424–425, p. 264–277, 2012.

KRAATZ, S.; KHANBILVARDI, R.; ROMANOV, P. River ice monitoring with MODIS: Application over Lower Susquehanna River. **Cold Regions Science and Technology**, v. 131, p. 116–128, 2016.

KUMAR, S.; MERWADE, V. Impact of watershed subdivision and soil data resolution on swat model calibration and parameter uncertainty. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 5, p. 1179–1196, 2009.

KUME, T.; TANAKA, N.; KURAJI, K.; KOMATSU, H.; YOSHIFUJI, N.; SAITOH, T. M.; SUZUKI, M.; KUMAGAI, T. Ten-year evapotranspiration estimates in a Bornean tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 9, p. 1183–1192, 2011.

KUNNATH-POOVAKKA, A.; RYU, D.; RENZULLO, L. J.; GEORGE, B. The efficacy of calibrating hydrologic model using remotely sensed evapotranspiration and soil moisture for streamflow prediction. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 509–524, 2016.

LERAT, J.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; VAZE, J.; PERRAUD, J. M.; RIBSTEIN, P.; LOUMAGNE, C. Do internal flow measurements improve the calibration of rainfall-runoff models? **Water Resources Research**, v. 48, n. 2, p. 1–18, 2012.

LIU, Y.; GUPTA, H. V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. **Water Resources Research**, v. 43, n. 7, p. 1–18, 2007.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F. DE; ANDRÉ, R. G. B.; SILVA, B. B. DA; FERREIRA, N. DE J. Estimativa do fluxo do calor sensível utilizando o algoritmo SEBAL e imagens MODIS para a região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 85–94, 2012.

MIRANDA, E. E. DE. Brasil em relevoCampinas: Embrapa Monitoramento por SatéliteEMBRAPA, , 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>

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

MUTHUWATTA, L. A. L. P.; BOOIJ, M. J.; RIENTJES, T. O. M. H. M. Calibration of a semi-distributed hydrological model using discharge and remote sensing data. **New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions**, n. September, p. 52–58, 2009.

- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation Texas Texas A&M University System, , 2011.
- NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- OEURNG, C.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J.-M. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 401, n. 3–4, p. 145–153, 2011.
- ONS. Novo modelo de previsão de vazões com informação de precipitação para a bacia do rio Iguacu. 2007.
- ONS. Atualização De Séries Históricas De Vazões – Período 1931 a 2015 ONS RE ONS 0181/2016, , 2016.
- OUDIN, L.; ANDRÉASSIAN, V.; MATHEVET, T.; PERRIN, C.; MICHEL, C. Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. **Water Resources Research**, v. 42, n. 7, p. 1–10, 2006.
- PALMER, S. C. J.; KUTSER, T.; HUNTER, P. D. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. **Remote Sensing of Environment**, v. 157, p. 1–8, 2015.
- PARKINSON, C. L.; WARD, A.; KING, M. D. (EDS.). **Earth science reference handbook. A guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions**. Washington, D.C: National Aeronautics and Space Administration, 2006.
- PETROPOULOS, G. P.; IRELAND, G.; BARRETT, B. Surface Soil Moisture Retrievals from Remote Sensing: Current Status, Products & Future Trends. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 44, 2015.
- POST, D. F.; FIMBRES, A.; MATTHIAS, A. D.; SANO, E. E.; ACCIOLY, L.; BATCHILY, A. K.; FERREIRA, L. G. Predicting Soil Albedo from Soil Color and Spectral Reflectance Data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 1027, 2000.
- RAJIB, M. A.; MERWADE, V. Improving soil moisture accounting and streamflow prediction in SWAT by incorporating a modified time-dependent Curve Number method. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 4, p. 603–624, 2016.

RAJIB, M. A.; MERWADE, V.; YU, Z. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed/in-situ soil moisture. **Journal of Hydrology**, v. 536, p. 192–207, maio 2016.

RIENTJES, T. H. M.; MUTHUWATTA, L. P.; BOS, M. G.; BOOIJ, M. J.; BHATTI, H. A. Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 505, p. 276–290, 2013.

SANTOS, H. G. D.; CARVALHO JUNIOR, W. D.; DART, R. D. O. .; ÁGLIO, M. L. D. .; SOUSA, J. D. S. .; PARES, J. G. .; FONTANA, A. .; MARTINS, A. L. D. S.; OLIVEIRA, A. P. DE. Mapa de solos do Brasil EMBRAPA solos, , 2011.

SANTOS, R. D. O.; SCUDELARI, A. C.; LOURDES, C. DE. Avaliação da Produção e Aporte de Sedimentos para o Rio Potengi , RN. **RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, 2013.

SANTOS, C. A. C. DOS; SILVA, B. B. DA; RAO, T. V. R. ANALYSIS OF THE EVAPORATIVE FRACTION USING EDDY COVARIANCE AND REMOTE SENSING TECHNIQUES. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 427–436, 2010.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: Models and Methods for image Processing**. 3. ed. Tucson, Arizona: Elsevier, 2007.

SCHROEDER, W.; OLIVA, P.; GIGLIO, L.; QUAYLE, B.; LORENZ, E.; MORELLI, F. Active fire detection using Landsat-8/OLI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 210–220, 2016.

SEMA - SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Bacias Hidrográficas do Paraná Curitiba Governo do Estado do Paraná, , 2010. Disponível em: <http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/corh/Revista_Bacias_Hidrograficas_2015.pdf>

SHESHUKOV, A. Y.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; SINNATHAMBY, S.; DAGGUPATI, P. Pasture BMP effectiveness using an HRU-based subarea approach in SWAT. **Journal of Environmental Management**, v. 166, p. 276–284, 2016.

SILVA, B. B.; SILVA, S. T. A.; GOMES, H. B. Alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante sensoriamento remoto. **Revista Mercator**, v. 9, n. 1, p. 91–106, 2010.

SIMEPAR. Mapa de Climas do estado do Paraná, 2008. Disponível em: <www.itcg.pr.gov.br>

SOUSA, A. M. L. DE. Estimativa dos fluxos de calor a partir de imagens orbitais e aplicação na modelagem hidrológica. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

SRINIVASAN, R.; ZHANG, X.; ARNOLD, J. Swat Ungauged: Hydrological Budget and Crop Yield Predictions in the Upper Mississippi River Basin. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 53, n. 5, p. 1533–1546, 2010.

STRAUCH, M.; LIMA, J. E. F. W.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment. **Journal of Environmental Management**, v. 127, p. S24–S36, set. 2013.

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, n. 3–4, p. 355–376, 2005.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle S?o Francisco River basin, Brazil. Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3–4, p. 477–490, 2009.

UDA, P. K. Evapotranspiração real da bacia do rio Iguazu por meio do modelo METRIC. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental)

UDA, P. K.; CORSEUIL, C. W.; KOBIYAMA, M. Evapotranspiração Real da Bacia do Alto Rio Negro , Região Sul Brasileira , por meio do SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e Balanço Hídrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 205–217, 2014.

USGS. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**Earth Resources Observation and Science (EROS) Center**, 2015. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>

WAGENER, T.; GUPTA, H. V. Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 19, n. 6, p. 378–387, 2005.

WANDERS, N.; BIERKENS, M. F. P.; DE JONG, S. M.; DE ROO, A.; KARSSENBERG, D. The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models. **Water Resources Research**, v. 50, n. 8, p. 6874–6891, 2014.

WI, S.; YANG, Y. C. E.; STEINSCHNEIDER, S.; KHALIL, A.; BROWN, C. M. Calibration approaches for distributed hydrologic models in poorly gaged basins: Implication for streamflow projections under climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 2, p. 857–876, 2015.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K. C. Bayesian uncertainty analysis in distributed hydrologic modeling: A case study in the Thur River basin (Switzerland). **Water Resources Research**, v. 43, n. 10, p. 1–13, 2007.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K. C.; XIA, J.; YANG, H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1–2, p. 1–23, 2008.

YESUF, H. M.; ASSEN, M.; ALAMIREW, T.; MELESSE, A. M. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. **Catena**, v. 127, p. 191–205, 2015.

ZHANG, J.; LI, Q.; GUO, B.; GONG, H. The comparative study of multi-site uncertainty evaluation method based on SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 13, p. 2994–3009, 2015.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R. GIS-Based spatial precipitation estimation: A comparison of geostatistical approaches. **Journal of the American water resources association**, v. 45, n. 4, p. 894–906, 2009.

ZHANG, Y.; CHIEW, F. H. S.; ZHANG, L.; LI, H. Use of Remotely Sensed Actual Evapotranspiration to Improve Rainfall–Runoff Modeling in Southeast Australia. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, n. 4, p. 969–980, 2009.

ZHAO, J.; TEMIMI, M.; GHEDIRA, H. Remotely sensed sea surface salinity in the hyper saline Arabian Gulf: Application to landsat 8 OLI data. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 187, p. 168–177, 2017.

APÊNDICE I – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

ID	Código	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
0	2650008	Santa Cruz do Timbó	-26,38	-50,88	752
1	2651035	Fazenda Santa Teresa	-26,37	-51,87	1148
2	2649006	Rio Negro	-26,10	-49,80	808
3	2650005	Divisa	-26,08	-50,32	761
4	2652026	Butiá	-26,07	-52,09	850
5	2553007	Salto do Lontra	-25,78	-53,31	446
6	2553024	Capitão Leonidas Marques	-25,48	-53,62	374
7	2550053	Itapara	-25,47	-50,98	825
8	2551035	Campo de Dentro	-25,27	-51,25	1184
9	2552026	Goioxim	-25,20	-51,99	843
10	2551009	Campina do Simão	-25,11	-51,81	1037
11	2453023	Cascavel - OCEPAR	-24,93	-53,43	726
12	2549001	Porto Amazonas	-25,55	-49,88	810
13	2549003	Rio da Varzea dos Lima	-25,95	-49,39	847
14	2549004	Piraquara	-25,45	-49,07	917
15	2549006	Curitiba	-25,43	-49,27	901
16	2549019	Itaqui	-25,47	-49,57	919
17	2549082	Campo das Pedras	-25,58	-49,43	862
18	2549045	Bateias	-25,35	-49,52	884
19	2549047	Três Córregos	-25,23	-49,63	789
20	2549051	Bocaiuva do Sul	-25,20	-49,12	1003
21	2549059	Pedra Alta	-25,80	-49,88	828
22	2549061	Quitandinha	-25,86	-49,51	798
23	2549063	Rincão	-25,78	-49,15	928
24	2550005	Rio Claro do Sul (Eufrozina)	-25,95	-50,68	793
25	2550029	Gonçalves Junior	-25,47	-50,78	802
26	2550032	Água Azul	-25,82	-50,13	792
27	2550035	Turvo	-25,70	-50,52	874
28	2550037	Guaiaca	-25,62	-50,20	802
29	2551000	Guarapuava	-25,45	-51,45	1040

30	2551001	Leonópolis	-25,69	-51,20	993
31	2551004	Santa Clara	-25,64	-51,97	753
32	2551017	Santana	-25,94	-51,26	888
33	2551019	Santa Cruz	-25,85	-51,77	1083
34	2551024	Pinhão	-25,65	-51,67	1042
35	2551033	Palmeirinha	-25,25	-51,55	1109
36	2551047	Salto Curucaca	-25,53	-51,82	867
37	2552000	Quedas do Iguaçu	-25,45	-52,90	564
38	2552001	Aguas do Vere	-25,77	-52,93	421
39	2552006	Guaraniau	-25,08	-52,88	799
40	2552008	Marquinhos	-25,11	-52,26	855
41	2552022	Reserva do Iguaçu	-25,80	-52,02	920
42	2552030	Chopinzinho	-25,85	-52,52	680
43	2552037	Porto Barreiro	-25,52	-52,40	797
44	2552041	Cantagalo	-25,37	-52,12	822
45	2552047	Vila Guarani	-25,21	-52,65	852
46	2553004	Cruzeiro do Iguaçu	-25,57	-53,13	354
47	2553012	Ampere	-25,92	-53,48	515
48	2553014	Porto Moises Lupion	-25,58	-53,98	227
49	2553019	Ibema	-25,10	-53,07	856
50	2553026	Flor da Serra	-25,39	-53,38	383
51	2553033	Boi Preto	-25,15	-53,62	579
52	2553036	Nova Esperança	-25,95	-53,83	420
53	2553039	Sagrada Familia	-25,67	-53,68	438
54	2554002	Salto Cataratas	-25,68	-54,43	233
55	2554005	Matelandia	-25,24	-53,98	570
56	2554012	Sta Terezinha de Itaipú	-25,44	-54,40	271
57	2554018	Jardinópolis	-25,41	-54,04	279
58	2649017	Doutor Pedrinho	-26,72	-49,48	520
59	2649054	Moema	-26,53	-49,84	942
60	2649055	Corredeira	-26,42	-49,57	857
61	2649056	Itaiópolis	-26,33	-49,93	862
62	2649057	Campo Alegre	-26,19	-49,27	895
63	2649058	Barra do Prata	-26,70	-49,83	373

64	2650000	Salto Canoinhas	-26,37	-50,29	772
65	2650015	Residencia Fuck	-26,71	-50,29	814
66	2650016	Buriti	-26,56	-50,60	874
67	2650018	Pinheiros	-26,35	-50,65	774
68	2650019	Lebon Régis	-26,93	-50,69	988
69	2651004	Porto Vitória	-26,17	-51,22	785
70	2651022	Santo Agostinho	-26,61	-51,88	1183
71	2651023	Linha Santa Maria	-26,12	-51,57	841
72	2651026	Iratim	-26,48	-51,43	1151
73	2651036	Quilometro 30	-26,78	-51,26	1055
74	2651044	Calmon	-26,60	-51,12	1141
75	2652009	Ponte do Vitorino	-26,05	-52,80	521
76	2652010	Palmas	-26,48	-52,00	1072
77	2652011	Mariópolis	-26,35	-52,57	872
78	2652015	Salto Claudelino	-26,28	-52,30	821
79	2652031	São Lourenço do Oeste	-26,40	-52,90	708
80	2653001	Campo Ere - EMPASC	-26,44	-53,08	906
81	2653002	Dionisio Cerqueira	-26,27	-53,63	826
82	2653012	Francisco Beltrão	-26,08	-53,07	569
83	2653013	Palma Sola	-26,36	-53,28	868
84	2653014	Marcianópolis	-26,12	-53,65	536
85	2653019	Rio Verde	-26,23	-53,20	680
86	2653021	Siqueira Belo	-26,22	-53,48	634
87	2653022	Faxinal do Campo Ere	-26,38	-53,04	930
90	2649018	Fragosos	-26,15	-49,38	813

APÊNDICE II – ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

Nome	Rio	Código	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Área de contribuição (km²)
BALSA NOVA	IGUACU	65028000	-25.59	-49.64	861	2745
PORTO AMAZONAS	IGUACU	65035000	-25.55	-49.89	783	3625
SAO MATEUS DO SUL	IGUACU	65060000	-25.88	-50.39	760	6035
RIO NEGRO	NEGRO	65100000	-26.11	-49.80	780	3292
RIO DA VARZEA	DA VARZEA	65135000	-25.93	-49.39	812	605
QUITANDINHA	DA VARZEA	65136550	-25.86	-49.51	815	941
SAO BENTO	DA VARZEA	65155000	-25.94	-49.79	780	2006
DIVISA	NEGRO	65175000	-26.09	-50.33	760	8050
UNIÃO DA VITÓRIA	IGUACU	65310000	-26.23	-51.08	744	24209
PORTO VITORIA	IGUACU	65365800	-26.15	-51.22	750	24735
JANGADA	JANGADA	65370000	-26.39	-51.27	859	1014
MADEIREIRA GAVAZZONI	DA AREIA	65764000	-25.81	-51.29	817	976
SOLAIIS NOVO	IRATIM	65775900	-26.07	-51.91	617	1654
USINA CAVERNOSO	CAVERNOSO	65855000	-25.48	-52.22	562	1492
SALTO CLAUDELINO	CHOPIM	65925000	-26.28	-52.29	797	1655
PORTO PALMEIRINHA	CHOPIM	65927000	-26.03	-52.63	501	3340
PONTE DO VITORINO	VITORINO	65945000	-26.05	-52.80	525	495
AGUAS DO VERE	CHOPIM	65960000	-25.77	-52.93	405	6692
FLOR DA SERRA	CHOPIM	65962000	-25.68	-52.98	378	7237
PORTO SANTO ANTONIO	GUARANI	65970000	-25.39	-53.10	354	1084

SALTO CAXIAS	IGUACU	65975000	-25.54	-53.49	326	57060
SAO SEBASTIAO	ANDRADA	65979000	-25.43	-53.52	267	1314
PORTO CAPANEMA	IGUACU	65987000	-25.57	-53.94	220	63884

APÊNDICE III – ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Codigo	Nome	UF	Altitude	Latitude	Longitude	operador
25245437	Foz do Iguaçu	PR	232	-25.4	-54.6167	SIMEPAR
26285158	Palmas	PR	1100	-26.4667	-51.9667	SIMEPAR
25385157	Pinhão	PR	910	-25.6494	-51.9625	SIMEPAR
25315329	Salto Caxias	PR	440	-25.5166	-53.4833	SIMEPAR
26145103	União da Vitória	PR	0	-26.2333	-51.0666	SIMEPAR
2453023	Cascavel	PR	660	-24.8833	-53.55	IAPAR
2549091	Lapa	PR	910	-25.7833	-49.7667	IAPAR
2550024	Ponta Grossa	PR	880	-25.2167	-50.0167	IAPAR
2552009	Laranjeiras do Sul	PR	880	-25.4167	-52.4167	IAPAR
2553015	Planalto	PR	400	-25.7	-53.7833	IAPAR
2553018	Quedas do Iguaçu	PR	513	-25.5167	-53.0167	IAPAR
2554026	São Miguel do Iguaçu	PR	260	-25.4333	-54.3667	IAPAR
2652003	Cleveland ia	PR	930	-26.4167	-52.35	IAPAR
2652035	Pato Branco	PR	700	-26.1167	-52.6833	IAPAR
2653012	Francisco Beltrão	PR	650	-26.0833	-53.0667	IAPAR
2551010	Guarapuava	PR	1042	-25.3655	-51.5003	IAPAR
2550025	Fernandes Pinheiro	PR	893	-25.45	-50.5833	IAPAR
86945	Rio Negrinho	SC	857	-26.2484	-49.5806	INMET
83842	Curitiba	PR	924	-25.4333	-49.2667	INMET
83836	Irati	PR	837	-25.4667	-50.6333	INMET

APÊNDICE IV – PARÂMETROS

CN2: CN (Curve Number) para condição de umidade II. O CN é função da permeabilidade do solo, cobertura e condições antecedentes de umidade. O CN pode ser atualizado para as operações de crescimento e colheita. Em áreas urbanas, o modelo ajusta o CN de modo a refletir as condições de impermeabilidade.

SOL_AWC: Capacidade de água disponível para a camada de solo (mm H₂O/mm solo). A capacidade de água disponível para as plantas é calculada pela subtração da fração de água existente no ponto de murcha permanente da quantidade de água presente na capacidade de campo.

SLSOIL: Comprimento da rampa para escoamento lateral subsuperficial.

ALPHA_BF: Fator alpha de escoamento de base (dia-1). Constante de recessão de escoamento de base é uma medida direta da resposta do escoamento subsuperficial à mudanças na recarga. A constante de recessão pode ser estimada analisando hidrogramas durante períodos de recessão, quando não há recarga na bacia.

GW_DELAY: Tempo de atraso da recarga de aquífero. Representa o atraso entre o momento em que a água existe no perfil de solo e o momento em que a água contribui para recarga do aquífero raso. Não pode ser diretamente medido.

LAT_TTIME: Tempo de duração do escoamento lateral (dias).

CH_K1: Condutividade hidráulica efetiva dos canais aluviais tributários (mm/h). Este parâmetro controla as perdas do escoamento superficial até atingir o canal principal da subbacia.

CH_N1: Coeficiente de Manning para os canais tributários.

RCHRG_DP: Fração de água percolada da zona de raízes para o aquífero profundo.

CANMX: Volume máximo do armazenamento de copa quando o dossel está totalmente desenvolvido (mm H₂O).

DEP_IMP: Profundidade da camada impermeável de solo (mm).

GWQMN: Profundidade limite do aquífero raso para ocorrência de escoamento de retorno (mm H₂O). O escoamento de água subsuperficial para o canal só é possível quando o nível d'água no aquífero raso é igual ou superior ao GWQMN.

CH_K2: Condutividade hidráulica efetiva do canal aluvial principal (mm/h).

CH_N2: Coeficiente de Manning para o canal principal.

OV_N: Coeficiente de Manning para o escoamento superficial.

SLSUBBASIN: Distância em que o escoamento laminar é a forma dominante de escoamento superficial. É o comprimento médio de rampa em que o escoamento superficial começa a concentrar e formar linhas de fluxo bem definidas.

REVAPMN: Nível d'água limite do aquífero para ocorrência de evaporação ou percolação (mm H₂O). Movimento da água do aquífero raso para a zona de raízes só é possível quando o nível de água do aquífero raso é igual ou superior a REVAPMN.

GW_REVAP: Coeficiente de evaporação da água subterrânea que se move para a zona de raízes.

SURLAG: Coeficiente de atraso do escoamento superficial até o canal principal (dia).

EVLAI: Índice de área foliar no qual nenhuma evaporação da superfície de água ocorre. Evaporação da superfície de água só ocorre até que a cobertura vegetal atinja índice de área foliar definido em EVLAI.

EPCO: Coeficiente de compensação da extração de água do solo por plantas, para transpiração.

ESCO: Coeficiente de compensação de evaporação do solo.

SOL_K: Condutividade hidráulica saturada da camada de solo (mm/h).

APÊNDICE V – CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS CALIBRADOS, PARA O PERÍODO DE CALIBRAÇÃO (2006-2009), DE ACORDO COM A ESTRATÉGIA.

Estratégia E1:

CN2												
-2E-03	SOL_AWC											
-1E-02	2E-03	ALPHA_BF										
-9E-03	5E-03	-4E-04	GW_DELAY									
5E-03	2E-03	8E-04	1E-02	LAT_TTIME								
-4E-03	3E-04	1E-02	-2E-03	-2E-03	CH_K1							
-4E-03	-4E-03	2E-03	-1E-03	-2E-03	-1E-02	CH_N1						
-8E-03	-6E-03	-5E-04	-4E-03	-3E-03	-6E-03	-1E-03	RCHRG_DP					
9E-04	-4E-05	-1E-03	2E-03	-2E-03	-1E-03	2E-03	-5E-03	CANMX				
-5E-03	-2E-03	-1E-02	-1E-03	-3E-04	-2E-04	8E-03	-4E-03	-5E-03	DEP_IMP			
3E-03	1E-03	2E-02	-9E-04	-8E-03	-5E-04	-3E-03	4E-04	3E-03	-2E-03	GWQMN		
-2E-04	-1E-03	-2E-03	3E-03	4E-04	-6E-03	-6E-03	1E-02	-5E-03	1E-04	-2E-04	SLSOIL	

Estratègia E2:

CN2											
3E-03	SOL_AWC										
2E-03	2E-03	ALPHA_BF									
-2E-03	2E-03	5E-03	GW_DELAY								
-4E-03	-2E-03	2E-03	5E-03	LAT_TTIME							
-5E-03	6E-03	2E-03	-3E-03	-3E-03	CH_K1						
2E-03	-2E-03	2E-03	-3E-03	-5E-03	-3E-03	CH_N1					
-3E-03	4E-04	-4E-03	1E-03	-5E-03	-5E-03	1E-03	RCHRG_DP				
4E-03	7E-03	-6E-03	3E-03	-4E-03	3E-03	-5E-03	-5E-03	CANMX			
1E-04	2E-03	5E-03	-2E-03	5E-04	-2E-03	-5E-03	-2E-03	-4E-03	DEP_IMP		
6E-03	-4E-03	5E-03	5E-03	-7E-03	6E-04	-3E-04	7E-04	-5E-04	4E-03	GWQMN	
-7E-03	-7E-04	5E-03	-5E-03	1E-03	2E-04	-6E-04	4E-03	9E-04	2E-03	-3E-03	SLSOIL

Estratègia E3:

CN2											
-1E-03	SOL_AWC										
-7E-03	6E-04	ALPHA_BF									
-2E-03	5E-03	3E-03	GW_DELAY								
2E-03	1E-03	-1E-03	3E-03	LAT_TTIME							
-3E-03	4E-03	8E-03	-3E-03	-2E-03	CH_K1						
-3E-03	3E-03	6E-04	3E-03	-1E-03	-4E-03	CH_N1					
6E-03	-5E-03	-1E-03	3E-03	-4E-03	-1E-02	8E-04	RCHRG_DP				
-1E-03	6E-03	9E-03	-2E-03	-3E-03	9E-03	-4E-03	-3E-03	CANMX			
-2E-03	2E-03	-2E-02	2E-03	-2E-03	-4E-03	-1E-03	-4E-04	-2E-03	DEP_IMP		
7E-03	7E-04	1E-02	-4E-03	-1E-02	-2E-04	3E-03	-6E-03	-2E-04	1E-03	GWQMN	
-2E-03	6E-04	-2E-03	2E-03	-3E-03	-5E-03	-2E-03	7E-03	-6E-03	-3E-03	1E-03	SLSOIL

Estratègia E4:

CN2											
1E-03	SOL_AWC										
-3E-04	4E-03	ALPHA_BF									
-8E-03	-2E-03	8E-04	GW_DELAY								
-2E-03	-2E-03	1E-03	-2E-04	LAT_TTIME							
2E-04	2E-03	7E-04	9E-04	-3E-03	CH_K1						
-6E-03	-5E-03	3E-03	-2E-03	-4E-03	-3E-03	CH_N1					
-2E-03	3E-03	2E-03	4E-03	8E-04	-3E-03	3E-03	RCHRG_DP				
3E-03	1E-03	-2E-03	1E-03	-5E-03	5E-03	8E-04	-5E-03	CANMX			
-2E-03	-4E-03	-2E-02	8E-04	-3E-03	-6E-04	4E-03	-1E-03	-2E-03	DEP_IMP		
2E-03	-3E-03	2E-03	-7E-03	-3E-03	-2E-03	-1E-03	-5E-03	2E-03	-1E-03	GWQMN	
-4E-03	1E-03	2E-03	2E-03	1E-03	-3E-03	-2E-03	-5E-04	-8E-04	2E-03	1E-03	SLSOIL

Estratègia E5:

CN2											
-8E-05	SOL_AWC										
-4E-03	7E-03	ALPHA_BF									
-2E-03	5E-03	2E-03	GW_DELAY								
-6E-04	-4E-03	3E-05	4E-03	LAT_TTIME							
-1E-03	-3E-04	8E-04	4E-03	-3E-03	CH_K1						
3E-03	3E-03	-4E-03	-3E-03	2E-03	-2E-03	CH_N1					
-3E-03	2E-03	1E-02	3E-03	-1E-02	-4E-03	3E-03	RCHRG_DP				
9E-03	2E-03	-9E-03	-2E-03	-3E-03	6E-03	-2E-03	3E-03	CANMX			
9E-04	-2E-03	-6E-03	-1E-03	6E-03	3E-04	6E-03	-2E-03	2E-03	DEP_IMP		
7E-03	1E-03	-2E-03	-9E-03	-3E-03	3E-03	-3E-03	5E-03	9E-03	-7E-03	GWQMN	
-1E-03	3E-03	3E-03	-6E-04	3E-03	-2E-03	6E-03	6E-04	-5E-03	-8E-04	2E-03	SLSOIL

APÊNDICE VI – VALORES PARA OS FATORES P E R DE CADA ESTAÇÃO, PARA CADA ESTRATÉGIA ANALISADA.

ESCALA DIÁRIA 2006-2009(2002-2005)

CÓDIGO ESTAÇÃO	E1		E2		E3		E4		E5	
	fator-p	fator-r								
65028000	0,61(0,71)	1,01(1,37)	0,67(0,70)	0,86(1,04)	0,77(0,66)	1,21(1,41)	0,48(0,53)	0,55(0,67)	0,48(0,66)	1,00(1,08)
65035000	0,70(0,80)	1,15(1,55)	0,62(0,67)	0,93(1,15)	0,83(0,77)	1,34(1,58)	0,63(0,62)	0,64(0,75)	0,69(0,74)	1,18(1,19)
65060000	0,71(0,84)	1,21(1,47)	0,55(0,60)	0,89(1,06)	0,84(0,77)	1,30(1,41)	0,64(0,61)	0,59(0,69)	0,78(0,70)	1,14(1,01)
65100000	0,87(0,82)	1,31(1,34)	0,73(0,81)	0,90(0,99)	0,92(0,87)	1,35(1,37)	0,78(0,74)	0,63(0,67)	0,90(0,79)	1,31(0,84)
65135000	0,67(0,91)	0,92(1,54)	0,71(0,48)	0,76(1,14)	0,91(0,93)	1,07(1,59)	0,61(0,46)	0,44(0,66)	0,63(0,69)	0,94(1,20)
65136550	0,83(0,89)	1,37(1,71)	0,67(0,67)	1,08(1,24)	0,97(0,91)	1,58(1,77)	0,68(0,70)	0,66(0,72)	0,81(0,81)	1,41(1,27)
65155000	0,90(0,94)	1,70(2,01)	0,63(0,55)	1,26(1,42)	0,96(0,91)	1,80(2,01)	0,54(0,61)	0,87(0,92)	0,90(0,74)	1,80(1,45)
65175000	0,85(0,88)	1,64(1,75)	0,54(0,71)	1,13(1,28)	0,93(0,83)	1,70(1,81)	0,58(0,65)	0,81(0,88)	0,93(0,73)	1,66(1,21)
65310000	0,77(0,86)	1,40(1,45)	0,48(0,54)	0,93(1,03)	0,83(0,82)	1,43(1,44)	0,52(0,54)	0,65(0,70)	0,88(0,65)	1,34(1,01)
65365800	0,72(0,80)	1,24(1,24)	0,47(0,55)	0,81(0,87)	0,78(0,76)	1,26(1,22)	0,53(0,57)	0,57(0,60)	0,81(0,65)	1,16(0,85)
65370000	0,74(0,80)	0,98(1,16)	0,51(0,34)	0,65(0,73)	0,75(0,91)	0,94(1,07)	0,58(0,46)	0,48(0,52)	0,82(0,58)	1,04(0,76)
65764000	0,79(0,84)	1,08(1,21)	0,45(0,44)	0,69(0,78)	0,79(0,92)	1,06(1,11)	0,51(0,56)	0,50(0,54)	0,83(0,66)	1,11(0,72)
65775900	0,84(0,89)	1,15(1,10)	0,42(0,40)	0,67(0,64)	0,82(0,92)	1,06(1,04)	0,76(0,70)	0,54(0,49)	0,93(0,80)	1,19(0,77)
65855000	0,81(0,80)	1,06(1,25)	0,41(0,42)	0,69(0,82)	0,74(0,79)	0,99(1,08)	0,39(0,42)	0,54(0,55)	0,89(0,55)	1,18(0,78)
65925000	0,81(0,86)	0,76(0,86)	0,55(0,39)	0,44(0,49)	0,83(0,86)	0,73(0,83)	0,61(0,65)	0,36(0,40)	0,87(0,78)	0,78(0,66)
65927000	0,72(0,81)	0,80(0,85)	0,45(0,42)	0,50(0,54)	0,74(0,79)	0,80(0,82)	0,49(0,53)	0,37(0,39)	0,79(0,68)	0,78(0,65)
65945000	0,81(0,71)	0,90(0,95)	0,60(0,47)	0,62(0,65)	0,91(0,89)	1,01(0,99)	0,44(0,43)	0,40(0,42)	0,78(0,59)	0,87(0,73)
65960000	0,67(0,72)	0,75(0,82)	0,40(0,39)	0,50(0,55)	0,70(0,80)	0,80(0,82)	0,45(0,47)	0,35(0,38)	0,72(0,68)	0,71(0,62)
65962000	0,67(0,74)	0,78(0,85)	0,47(0,45)	0,51(0,57)	0,72(0,78)	0,82(0,84)	0,46(0,50)	0,36(0,39)	0,71(0,68)	0,73(0,63)
65970000	0,36(0,34)	0,60(0,57)	0,13(0,17)	0,38(0,37)	0,34(0,58)	0,64(0,59)	0,21(0,19)	0,31(0,27)	0,41(0,25)	0,62(0,41)
65975000	0,78(0,64)	1,18(1,20)	0,58(0,49)	0,66(0,80)	0,84(0,59)	1,22(1,17)	0,42(0,40)	0,46(0,57)	0,69(0,47)	0,94(0,87)
65979000	0,78(0,67)	0,64(0,75)	0,49(0,45)	0,45(0,52)	0,78(0,72)	0,68(0,71)	0,45(0,37)	0,32(0,33)	0,78(0,50)	0,68(0,51)
65987000	0,88(0,82)	1,35(1,30)	0,68(0,68)	0,76(0,88)	0,93(0,73)	1,44(1,29)	0,49(0,48)	0,55(0,62)	0,81(0,56)	1,12(0,96)
MÉDIA	0,75(0,79)	1,09(1,23)	0,53(0,51)	0,74(0,85)	0,81(0,8)	1,14(1,22)	0,53(0,53)	0,52(0,57)	0,78(0,65)	1,07(0,88)

ESCALA MENSAL 2006-2009(2002-2005)										
CÓDIGO ESTAÇÃO	E1		E2		E3		E4		E5	
	fator-p	fator-r								
65028000	0,33(0,73)	1,17(1,53)	0,67(0,75)	1,09(1,21)	0,65(0,83)	1,18(1,32)	0,38(0,50)	0,55(0,65)	0,65(0,81)	0,82(1,02)
65035000	0,75(0,92)	1,31(1,64)	0,79(0,77)	1,15(1,25)	0,96(0,98)	1,29(1,40)	0,65(0,63)	0,63(0,70)	0,88(0,92)	0,90(1,05)
65060000	0,92(0,92)	1,23(1,55)	0,77(0,75)	1,00(1,12)	0,96(0,98)	1,15(1,30)	0,77(0,60)	0,59(0,67)	0,88(0,85)	0,78(0,91)
65100000	0,98(0,81)	1,46(1,46)	0,90(0,88)	1,07(1,07)	0,94(0,98)	1,22(1,26)	0,81(0,83)	0,64(0,66)	0,81(0,96)	0,74(0,74)
65135000	0,58(0,98)	1,23(1,74)	0,67(0,58)	1,05(1,28)	0,85(1,00)	1,22(1,53)	0,56(0,56)	0,49(0,66)	0,79(0,71)	0,81(1,15)
65136550	0,81(0,94)	1,64(1,84)	0,77(0,73)	1,36(1,35)	1,00(0,98)	1,63(1,68)	0,67(0,77)	0,66(0,68)	0,83(0,83)	1,04(1,15)
65155000	0,98(0,96)	1,97(2,03)	0,69(0,63)	1,53(1,44)	0,96(0,94)	1,80(1,77)	0,67(0,71)	0,86(0,85)	0,63(0,67)	1,18(1,20)
65175000	0,98(0,94)	1,65(1,78)	0,71(0,75)	1,24(1,30)	0,94(0,96)	1,43(1,57)	0,73(0,77)	0,73(0,81)	0,60(0,79)	0,91(1,00)
65310000	0,96(0,85)	1,33(1,43)	0,63(0,56)	1,01(1,01)	0,96(0,85)	1,17(1,23)	0,73(0,65)	0,60(0,64)	0,52(0,63)	0,77(0,84)
65365800	0,88(0,88)	1,13(1,19)	0,67(0,52)	0,86(0,84)	0,94(0,88)	1,00(1,02)	0,67(0,63)	0,51(0,54)	0,71(0,79)	0,65(0,69)
65370000	0,88(0,85)	1,32(1,34)	0,60(0,44)	0,93(0,85)	0,90(0,85)	1,08(1,12)	0,71(0,63)	0,58(0,60)	0,75(0,54)	0,72(0,76)
65764000	0,90(0,83)	1,30(1,41)	0,67(0,54)	0,92(0,87)	0,85(0,85)	1,10(1,14)	0,71(0,69)	0,56(0,61)	0,54(0,58)	0,66(0,73)
65775900	0,98(0,94)	1,49(1,32)	0,60(0,46)	0,93(0,75)	0,94(0,90)	1,28(1,15)	0,88(0,71)	0,67(0,58)	0,92(0,85)	0,91(0,82)
65855000	0,90(0,75)	1,17(1,30)	0,46(0,50)	0,85(0,84)	0,73(0,73)	0,94(1,03)	0,52(0,54)	0,53(0,56)	0,46(0,56)	0,67(0,73)
65925000	0,88(0,75)	1,01(1,02)	0,63(0,38)	0,64(0,56)	0,90(0,81)	0,84(0,85)	0,56(0,63)	0,45(0,47)	0,81(0,85)	0,68(0,70)
65927000	0,71(0,65)	0,85(0,88)	0,54(0,42)	0,61(0,56)	0,81(0,69)	0,73(0,74)	0,46(0,48)	0,38(0,39)	0,77(0,71)	0,57(0,61)
65945000	0,81(0,69)	0,98(1,02)	0,71(0,52)	0,72(0,71)	0,96(0,88)	0,88(0,92)	0,44(0,46)	0,38(0,40)	0,65(0,73)	0,58(0,69)
65960000	0,67(0,63)	0,79(0,88)	0,58(0,46)	0,60(0,60)	0,81(0,79)	0,71(0,77)	0,44(0,40)	0,36(0,38)	0,71(0,75)	0,52(0,60)
65962000	0,69(0,63)	0,79(0,90)	0,54(0,44)	0,61(0,62)	0,83(0,77)	0,71(0,79)	0,38(0,50)	0,36(0,39)	0,77(0,81)	0,52(0,61)
65970000	0,56(0,42)	0,98(0,91)	0,35(0,27)	0,70(0,58)	0,54(0,58)	0,88(0,84)	0,33(0,23)	0,48(0,40)	0,40(0,38)	0,60(0,57)
65975000	0,72(0,71)	0,97(1,27)	0,74(0,58)	0,74(0,86)	0,72(0,56)	0,86(1,10)	0,57(0,31)	0,45(0,58)	0,51(0,50)	0,59(0,83)
65979000	0,84(0,60)	0,78(0,95)	0,60(0,44)	0,61(0,66)	0,87(0,69)	0,71(0,82)	0,47(0,31)	0,32(0,38)	0,56(0,49)	0,47(0,55)
65987000	0,91(0,88)	1,12(1,33)	0,74(0,73)	0,86(0,90)	0,80(0,81)	1,01(1,17)	0,59(0,58)	0,52(0,60)	0,59(0,69)	0,70(0,88)
MÉDIA	0,81(0,79)	1,2(1,34)	0,65(0,57)	0,92(0,92)	0,86(0,84)	1,08(1,15)	0,6(0,57)	0,53(0,57)	0,68(0,71)	0,73(0,82)

APÊNDICE VII – HIDROGRAMAS MENSAIS OBSERVADOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E 95PPU DE CADA ESTRATÉGIA DE CALIBRAÇÃO.

