

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JONAS DILL

GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
CUBATÃO: SIMULAÇÃO DO IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE
USO DO SOLO ATRAVÉS DA MODELAGEM SWAT

JOINVILLE
2021
JONAS DILL

**GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
CUBATÃO: SIMULAÇÃO DO IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE
USO DO SOLO ATRAVÉS DA MODELAGEM SWAT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração em Engenharia Urbana e da Construção Civil.

Prof. Orientadora: Dra. Virgínia Grace Barros

JOINVILLE

2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Dill, Jonas.
GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO CUBATÃO : SIMULAÇÃO DO
IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE USO DO
SOLO ATRAVÉS DA MODELAGEM SWAT / Jonas Dill. --
2021.
178 p.

Orientadora: Virgínia Grace Barros
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2021.

1. Simulação Hidrológica. 2. SWAT+. 3. Bacia do Rio
Cubatão. 4. SWAT+ ToolBox. I. Barros, Virgínia Grace. II.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

JONAS DILL

**GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
CUBATÃO: SIMULAÇÃO DO IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE
USO DO SOLO ATRAVÉS DA MODELAGEM SWAT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração em Engenharia Urbana e da Construção Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr.^a Virgínia Grace Barros
CCT/Udesc

Membros:

Prof. Dr. Leonardo Romero Monteiro
CCT/Udesc

Prof^a. Dr.^a Therezinha Maria Novais de Oliveira
Univille

Joinville, 29 de outubro de 2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos envolvidos, direta ou indiretamente, na realização deste estudo. Em especial, à professora Virgínia Grace Barros, que me orientou durante todo o processo. Sua ajuda e dedicação foram fundamentais, e servirão de inspiração para as próximas etapas de minha vida.

À minha esposa, Kamila Mariana Devegili, pelo apoio e paciência. Um verdadeiro suporte durante este período. Não teria conseguido sem você ao meu lado.

Ao meus pais Gernot e Irene, por todo incentivo e motivação para continuar em frente.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (Capes), pela bolsa de estudos integral, que viabilizou a dedicação exclusiva para a realização do estudo.

RESUMO

Alterações climáticas e de uso e ocupação do solo (UOS) podem ter grande influência na disponibilidade de recursos hídricos de uma região. Por sua vez, os recursos hídricos estão intrinsicamente ligados à produção econômica. Assim, a gestão dos recursos hídricos e o conhecimento de como estes são afetados pelo clima e UOS são essenciais no desenvolvimento regional. Desse modo o presente estudo procurou avaliar a disponibilidade hídrica sob os efeitos da mudança climática (2019-2099) de um Modelo Climático Global com quatro Caminhos de Concentração Representativos (*Representative Concentration Pathways*), os RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, e os efeitos da mudança do UOS previstos para a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão (BHRC), pela lei de zoneamento municipal. Os dados utilizados foram coletados no Hidroweb da Agência Nacional de Águas, no WebGIS do Comitê Cubatão Cachoeira Joinville e nas previsões geradas para o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. A avaliação utilizou o modelo SWAT para simular o comportamento hídrico futuro da BHRC. Foram analisadas, ainda, as características da gestão de recursos hídricos atualmente empregadas na região. Diversas fragilidades na gestão dos recursos hídricos locais foram evidenciadas e sugestões foram propostas. A escassez de dados de precipitação teve impacto direto na vazão mensal média estimada, com estimativa de redução de 45,4% (RCP 2.6), 41,9% (RCP 4.5), 43,2% (RCP 6.0) e 41,7% (RCP 8.5) até o fim do século. A mudança prevista de UOS reduz o impacto na diminuição da vazão média mensal, até 2099, em 2,9% (RCP2.6), 2,5% (RCP 4.5) e 2,7% (RCP 6.0 e 8.5). A evapotranspiração efetiva prevista foi menor em 2,4% (RCP 2.6 e 6.0) e 2,3% (RCP 4.5 e 8.5) com alteração de UOS nos cenários futuros. A BHRC já utiliza, praticamente, toda vazão outorgável, situação que se agravará com o crescimento populacional e pode frear o crescimento econômico local.

Palavras-chave: Simulação Hidrológica; SWAT+; Bacia do Rio Cubatão; SWAT+ ToolBox.

ABSTRACT

Changes in climate and land use and land cover (LULC) can greatly influence the availability of water resources in a region. In turn, water resources are intrinsically linked to economic production. Thus, the management of water resources and knowledge of how they are affected by climate and LULC are essential for regional development. Thus, this study sought to assess the water availability under the effects of climate change (2019-2099) of a Global Climate Model with four Representative Concentration Pathways, the RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5, and the effects of the LULC change foreseen for the Cubatão River Hydrographic Basin (BHRC), by the municipal zoning law. The data used were collected from the Hidroweb of the National Water Agency, the WebGIS of the Cubatão Cachoeira Joinville Committee and the forecasts generated for the Intergovernmental Panel on Climate Change. The assessment used the SWAT model to simulate the future water behavior of the BHRC. The characteristics of water resources management currently used in the region were also analyzed. Several weaknesses in the management of local water resources were highlighted and suggestions were proposed. The scarcity of precipitation data had a direct impact on the estimated average monthly flow, with an estimated reduction of 45.4% (RCP 2.6), 41.9% (RCP 4.5), 43.2% (RCP 6.0) and 41.7 % (RCP 8.5) by the end of the century. The predicted change of UOS reduces the impact on the decrease of the monthly average flow, until 2099, by 2.9% (RCP2.6), 2.5% (RCP 4.5) and 2.7% (RCP 6.0 and 8.5). The predicted effective evapotranspiration was lower by 2.4% (RCP 2.6 and 6.0) and 2.3% (RCP 4.5 and 8.5) with change in UOS in future scenarios. BHRC already uses practically all the flow that can be granted, a situation that will worsen with population growth and may slow local economic growth.

Keywords: Hydrological Simulation; SWAT+; Cubatão River Basin; SWAT+ ToolBox.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo Hidrológico e Armazenamento	28
Figura 2 – Interação dos Componentes do Ciclo Hidrológico.....	28
Figura 3 – Bacia Hidrográfica Delimitada em Mapa Topográfico	30
Figura 4 – Processos da Modelagem da Fase Terrestre	39
Figura 5 – Perfil Margem de Alagamento SWAT.....	47
Figura 6 – Fluxograma das Etapas do Trabalho	59
Figura 7 – BHRC e Área de Estudo	60
Figura 8 – Distribuição de Precipitações para a Bacia do Cubatão (1979-2008)	63
Figura 9 – Modelo Digital de Elevação da Área de Estudo	66
Figura 10 – Mapa de Solos da Área de Estudo.....	67
Figura 11 – Uso e Ocupação do Solo da Área de Estudo.....	69
Figura 12 – Localização das Estações Meteorológicas Utilizadas	73
Figura 13 – Localização das Estações Fluviométricas Utilizadas	74
Figura 14 – Zoneamento da Área de Estudo	80
Figura 15 – Títulos Minerários – Material	80
Figura 16 – Títulos Minerários – Fase.....	81
Figura 17 – Alteração de Uso e Ocupação do Solo	82
Figura 18 – Localização das Estações Virtuais	85
Figura 19 – Cenários avaliados na simulação (2ª Etapa).....	87
Figura 20 – Sub-bacias, Canais e Exutório	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos Solos da Área de Estudo	66
Tabela 2 – Distribuição do Solo.....	68
Tabela 3 – Distribuição do Uso e Ocupação do Solo	70
Tabela 4 – Estações Climáticas	72
Tabela 5 – Coeficientes de Conversão de Precipitação.....	74
Tabela 6 – Comportamento Calibração x Validação	78
Tabela 7 – Distribuição Uso e Ocupação do Solo	81
Tabela 8 – Estações IPCC	86
Tabela 9 – Parâmetros Relevantes	89
Tabela 10 – Calibração dos Parâmetros	89
Tabela 11 – Estatísticas de Precisão Obtidas	90
Tabela 12 – Vazões C-1	91
Tabela 13 – Teste t de Student - Vazões C-1 (p-valor)	92
Tabela 14 – Evapotranspiração C-1	92
Tabela 15 – Teste t de Student - Evapotranspiração C-1 (p-valor)	92
Tabela 16 – Comportamento da Precipitação Série Histórica vs. GCMs (2008-2018)	93
Tabela 17 – Precipitação Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018).....	94
Tabela 18 – Teste t de Student – Precipitação - 1ª Etapa C-2 (p-valor).....	94
Tabela 19 – Temperatura Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)	95
Tabela 20 – Teste t de Student – Temperatura - 1ª Etapa C-2 (p-valor)	95
Tabela 21 – Evapotranspiração Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)	96
Tabela 22 – Teste t de Student – Evapotranspiração - 1ª Etapa C-2 (p-valor).....	96
Tabela 23 – Vazão Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)	97
Tabela 24 – Teste t de Student – Precipitação – 2ª Etapa C-2 (p-valor)	98
Tabela 25 – Teste t de Student – Temperatura – 2ª Etapa C-2 (p-valor)	99
Tabela 26 – Teste t de Student – Evapotranspiração – 2ª Etapa C-2 (p-valor)	100
Tabela 27 – Teste t de Student - Vazão 2ª Etapa C-2 (p-valor)	102
Tabela 28 – ET Média Mensal Estimada C-3 - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)	104
Tabela 29 – Teste t de Student – Evapotranspiração - 1ª Etapa C-3 (p-valor).....	104

Tabela 30 – Teste t de Student – Vazão - 1ª Etapa C-3 (p-valor)	105
Tabela 31 – Vazão Média Mensal Estimada C-3 - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)	105
Tabela 32 – Teste t de Student – Evapotranspiração – 2ª Etapa C-3 (p-valor)	106
Tabela 33 – Teste t de Student - Vazão – 2ª Etapa C-3 (p-valor)	107
Tabela 34 – Teste t de Student - Evapotranspiração C-2 vs. C-3 (p-valor)	108
Tabela 35 – Teste t de Student - Vazão C-2 vs. C-3 (p-valor)	109
Tabela 36 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 2.6)	142
Tabela 37 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 4.5)	143
Tabela 38 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 6.0)	144
Tabela 39 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 8.5)	145
Tabela 40 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 2.6)	146
Tabela 41 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 4.5)	147
Tabela 42 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 6.0)	148
Tabela 43 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 8.5)	149
Tabela 44 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 2.6)	150
Tabela 45 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 4.5)	151
Tabela 46 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 6.0)	152
Tabela 47 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 8.5)	153
Tabela 48 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 2.6)	154
Tabela 49 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 4.5)	155
Tabela 50 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 6.0)	156
Tabela 51 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 8.5)	157
Tabela 52 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 2.6)	158
Tabela 53 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 4.5)	159
Tabela 54 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 6.0)	160
Tabela 55 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 8.5)	161
Tabela 56 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 2.6)	162
Tabela 57 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 4.5)	163
Tabela 58 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 6.0)	164
Tabela 59 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 8.5)	165
Tabela 60 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 2.6)	166

Tabela 61 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 4,5)	167
Tabela 62 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 6.0)	168
Tabela 63 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 8.5)	169
Tabela 64 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 2.6).....	170
Tabela 65 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 4.5).....	171
Tabela 66 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 6.0).....	172
Tabela 67 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 8.5).....	173
Tabela 68 – Principais Resultados Obtidos.....	174
Tabela 69 – CN2 para Áreas Urbanas	175
Tabela 70 – CN2 para de Agriculturas Cultivadas.....	176
Tabela 71 – CN2 para Outras Áreas de Agricultura	177
Tabela 72 – CN2 para Regiões Áridas e Semiáridas	178

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Variáveis Climáticas Solicitadas pelo Modelo	40
Quadro 2 – Parâmetros do Solo.....	68
Quadro 3 – Relação Código e Uso e Ocupação do Solo	70
Quadro 4 – Parâmetros Seleccionados para Avaliação.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2w2e	<i>Water Weather Energy Ecosystem</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ARPA	Área Rural de Preservação Ambiental
ARS	Serviço de Pesquisa Agrícola do USDA
BHRC	Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão
C-1	Cenário 1: Mudança do Uso e Ocupação
C-2	Cenário 2: Alterações Climáticas
C-3	Cenário 3: Efeito Combinado
CBERS	Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CCJ	Comitê Cubatão Cachoeira Joinville
CMIP5	Projeto de Inter comparação de Modelo Acoplado, Fase 5
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CREAMS	Produtos Químicos, Escoamento e Erosão dos Sistemas de Gestão Agrícola
DDS	<i>Dynamically Dimensioned Search</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EPIC	Calculador de Impacto Erosão-Produtividade
ET	evapotranspiração
ETA	Estação de Tratamento de Água do Cubatão
Cubatão	
GCM	Modelos Globais Climáticos
GCM4	MIROC-ESM-CHEM
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLEAMS	Efeito das Descargas Subterrâneas os Sistemas de Gestão Agrícola
HRU	Unidades de Resposta Hidrológica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LOT	Lei de Ordenamento Territorial
MDE	Modelo Digital de Elevação
MPF	Ministério Público Federal

NASA	Agência de Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço do Estados Unidos
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
S.A.	Uso e Ocupação do Solo Atual
S.F.	Uso e Ocupação do Solo Futuro
S.H.	Série Histórica
SAMA	Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente
SC	Santa Catarina
SCD	Satélite de Coleta de Dados
SCS-CN	Procedimento de Número de Curva SCS
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico e Sustentável
SEEG/OG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima
SEPUD	Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWRRB	Simulador para Recursos Hídricos de Bacias Rurais
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UOS	Uso e Ocupação do Solo
urld	Residencial de Baixa Densidade
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
USGS	Departamento de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos
WCRP	Programa Mundial de Pesquisa do Clima
WMO	Organização Mundial de Meteorologia
WWAP	Programa de Avaliação da Água das Nações Unidas

LISTA DE SÍMBOLOS

agrl	Agricultura genérica
ARUC	Área rural de utilização controlada
AU	Áreas urbanizadas
AWC	Capacidade de armazenamento de água nas camadas de solo
barr	Solo exposto
bnk	Quantidade de água na margem [m ³]
bnk _{in}	Quantidade de água armazenada na margem [m ³]
canmx	Capacidade máxima de armazenamento das copas
CHb	Cambissolo húmico
CN2	Número de curva
coef _{ch}	Coeficiente de ajuste
CXb	Cambissolo háplico
CYb	Cambissolo flúvico
days _{tot}	Número de dias no mês
D _D	Número de dias secos no mês
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês [°C]
D _W	Número de dias úmidos no mês
D _{W/D}	Número de dias úmidos seguidos de dias secos no mês
D _{W/W}	Número de dias úmidos seguidos de dias úmidos no mês
e	Pressão atmosférica na temperatura [kPa]
e ₀	Pressão de saturação [kPa]
E ₀	Evapotranspiração de potencial estimada [mm/dia]
E _a	Evapotranspiração no dia <i>i</i> [mm]
E _{ch}	Evaporação diária [m ³]
epco	Fator de compensação de absorção pela vegetação
esco	Fator de compensação de evaporação do solo
Et	Volume da evaporação [m ³]
FC _{ly}	Capacidade de armazenamento de água da camada do solo [mm]
flow _{min}	Valor mínimo armazenado no aquífero para ocorrer vazão reversa
frse _{suhf}	Floresta tropical sempre-verde úmida
fr _{Δt}	Divisão do tempo de concentração pelo período analisado
Gt	Volume do escoamento subterrâneo [m ³]

I_a	Abstrações iniciais [mm]
k	Condutividade hidráulica saturada
K_{ch}	Constante hidráulica do canal [mm/h]
K_{sat}	Condutividade hidráulica saturada da camada [mm/h]
L_{ch}	Comprimento do canal [km]
NSE	Coeficiente de nash-sutcliffe
P	Intensidade da precipitação [m^3/s]
PAd	Argissolo amarelo
Pbias	Tendência percentual
P_{ch}	Perímetro molhado [m]
pine	Vegetação predominantemente de pinus
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês
P_t	Volume precipitado [m^3]
PVA	Argissolo vermelho-amarelo
Q_{75}	Vazão igualada ou superada em 75 por cento do tempo
Q_{90}	Vazão igualada ou superada em 90 por cento do tempo
Q_{95}	Vazão igualada ou superada em 95 por cento do tempo
Q_{98}	Vazão igualada ou superada em 98 por cento do tempo
Q_e	Volume de água que entra na bacia [m^3]
Q_{gw}	Quantidade de retorno do fluxo no dia i [mm]
Q_s	Volume de água que sai da bacia [m^3]
Q_{surf}	Volume escoado superficialmente no dia i [mm]
Q_t	Volume do escoamento superficial [m^3]
R^2	Coeficiente de determinação
R_a	Radiação extraterrestre [$MJ/m^2/d$]
R_{day}	Quantidade precipitada no dia i [mm]
revap_co	Coeficiente de movimentação da água subterrânea
revap_min	Limite mínimo de "revap" para ocorrer percolação para o aquífero profundo
rice160	Arroz com 160 dias de maturação
RLd	Neossolo litólico

rnd_1	Número aleatório entre 0,0 e 1,0 [kPa]
$rngb_suhf$	Floresta tropical sempre-verde úmida com arbustos
S	Parâmetro de retenção
SAT_{ly}	Quantidade de água na camada quando esta está saturada [mm]
SW_0	Umidade do solo inicial no dia i [mm]
SW_1	Quantidade final de água no solo [mm]
SW_{ly}	Umidade da camada do solo [mm]
$SW_{ly,excess}$	Volume de água drenável na camada do solo em determinado dia [mm]
t	Tempo [dias]
T_{ar}	Temperatura média do ar [°C]
T_{av}	Temperatura média do ar em determinado dia [°C]
t_{loss}	Perdas de transição do canal [m³]
T_{mm}	Temperatura mínima do ar em determinado dia [°C]
T_{mx}	Temperatura máxima do ar em determinado dia [°C]
Tt	Volume da transpiração [m³]
TT	Tempo de translação
TT_{perc}	Tempo de duração da percolação [horas]
$UR\%$	Umidade relativa média do ar
V_{bnk}	Volume de água que retorna ao canal da margem [m³]
V_{in}	Volume de entrada [m³]
V_{out}	Volume de saída [m³]
W	Largura superficial do canal [m]
$wenb$	Vegetação herbácea de zonas úmidas
$wetn$	Vegetação herbácea emergente em zonas úmidas sem florestas
$W_{perc,ly}$	Quantidade de água que percola num dia [mm]
W_{seep}	Quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i [mm]
z	Profundidade das camadas de solo
α_{bnk}	Constante de retorno
Δt	Duração do intervalo de tempo utilizado [horas]
ΔV	Corresponde à variação do volume armazenado [m³]
ΔV_{stored}	Volume armazenado [m³]

λ	Calor latente de vaporização [MJ/kg]
μ_{10m}	Velocidade média do vento em determinado dia [m/s]
$\mu_{D_{rad_{mon}}}$	Radiação solar diária média no mês em dias secos [MJ /m ² d]
$\mu_{rad_{mon}}$	Radiação solar diária no mês em questão [MJ/m ² d]
$\mu_{wnd_{mon}}$	Velocidade média mensal do vento [m/s]
$\mu_{W_{rad_{mon}}}$	Radiação solar diária média no mês em dias úmidos [MJ /m ² d]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA.....	24
1.2	OBJETIVOS.....	26
1.2.1	Geral.....	26
1.2.2	Específicos	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	CICLO HIDROLÓGICO	27
2.1.1	Bacia Hidrográfica	29
2.1.2	Balanço Hídrico	30
2.1.3	Conceitos Fundamentais	31
2.2	SENSORIAMENTO REMOTO.....	32
2.3	GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	33
2.4	ALTERAÇÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	34
2.5	MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	35
2.6	SWAT / SWAT+	36
2.6.1	Histórico	37
2.6.2	Principais Aspectos.....	37
2.6.2.1	Fase Terrestre do Ciclo Hidrológico.....	38
<u>2.6.2.1.1</u>	<u>Clima</u>	<u>40</u>
<u>2.6.2.1.2</u>	<u>Hidrologia</u>	<u>42</u>
<u>2.6.2.1.3</u>	<u>Cobertura do Terreno / Crescimento Vegetal.....</u>	<u>45</u>
<u>2.6.2.1.4</u>	<u>Práticas de Gestão.....</u>	<u>46</u>
2.6.2.2	Propagação entre Canais	46
<u>2.6.2.2.1</u>	<u>Perfil dos Canais</u>	<u>47</u>
<u>2.6.2.2.2</u>	<u>Método do Armazenamento Variável</u>	<u>48</u>
<u>2.6.2.2.3</u>	<u>Perdas por Evaporação</u>	<u>49</u>
<u>2.6.2.2.4</u>	<u>Armazenamento nas Margens</u>	<u>49</u>
<u>2.6.2.2.5</u>	<u>Balanço Hídrico do Canal.....</u>	<u>50</u>
2.6.3	Aplicações do SWAT	51
2.7	SWAT+ EDITOR / SWAT+ TOOLBOX	52
2.7.1	Análise de Sensibilidade.....	53
2.7.2	Calibração	54

2.7.3	Estatísticas de Precisão.....	55
2.7.3.1	Coeficiente de Nash-Sutcliffe – NSE	55
2.7.3.2	Coeficiente de Determinação – R ²	55
2.7.3.3	Tendência Percentual – <i>Pbias</i>	56
2.7.3.4	Valores Satisfatórios	56
3	METODOLOGIA.....	58
3.1	SOFTWARES UTILIZADOS	59
3.2	ÁREA DE ESTUDO	60
3.2.1	Localização	60
3.2.2	Clima na Área de Estudo.....	62
3.2.3	Solo na Área de Estudo.....	63
3.2.4	Uso e Ocupação do Solo.....	64
3.2.5	Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos em Santa Catarina e Demandas e Disponibilidade Hídrica	64
3.3	ELABORAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT.....	65
3.3.1	Criação das HRUs.....	65
3.3.1.1	Modelo Digital de Elevação	65
3.3.1.2	Mapa de Solos.....	66
3.3.1.3	Mapa de Uso e Ocupação do Solo	68
3.3.1.4	HRUs	70
3.3.2	Dados Climáticos.....	71
3.3.3	Vazão Observada.....	74
3.4	CALIBRAÇÃO E CONFIRMAÇÃO DO MODELO.....	75
3.4.1	Definição dos Parâmetros de Avaliação.....	75
3.4.2	Análise de Sensibilidade.....	76
3.4.3	Calibração	77
3.4.4	Confirmação/Validação	77
3.4.5	Desempenho do Modelo	78
3.5	SIMULAÇÕES	78
3.5.1	Cenário 1: Mudança do Uso e Ocupação	79
3.5.1.1	Descrição do Uso e Ocupação do Solo Atual e Futuro.....	79
3.5.1.2	Análises Efetuadas Para C-1	82
3.5.2	Cenário 2: Alterações Climáticas	83
3.5.2.1	Descrição das Mudanças Climática	83

3.5.2.2	Análises efetuadas em C-2.....	86
3.5.3	Cenário 3: Efeito Combinado.....	87
3.5.4	Comparação C-2 vs. C-3.....	87
4	RESULTADOS	88
4.1	MODELAGEM	88
4.2	SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	88
4.3	SIMULAÇÕES	90
4.3.1	C-1: Alteração de Uso e Ocupação	90
4.3.2	C-2: Mudanças Climáticas	92
4.3.2.1	Determinação do GCM	92
4.3.2.2	C-2: Primeira Etapa	93
<u>4.3.2.2.1</u>	<u>Precipitação</u>	<u>93</u>
<u>4.3.2.2.2</u>	<u>Temperatura.....</u>	<u>94</u>
<u>4.3.2.2.3</u>	<u>Evapotranspiração</u>	<u>95</u>
<u>4.3.2.2.4</u>	<u>Vazão</u>	<u>96</u>
4.3.2.3	C-2: Segunda Etapa	97
<u>4.3.2.3.1</u>	<u>Precipitação</u>	<u>97</u>
<u>4.3.2.3.2</u>	<u>Temperatura.....</u>	<u>99</u>
<u>4.3.2.3.3</u>	<u>Evapotranspiração</u>	<u>100</u>
<u>4.3.2.3.4</u>	<u>Vazão</u>	<u>101</u>
4.3.3	C-3: Efeito combinado.....	103
4.3.3.1	C-3: Primeira Etapa	103
<u>4.3.3.1.1</u>	<u>Evapotranspiração</u>	<u>103</u>
<u>4.3.3.1.2</u>	<u>Vazão</u>	<u>104</u>
4.3.3.2	C-3: Segunda Etapa	105
<u>4.3.3.2.1</u>	<u>Evapotranspiração</u>	<u>106</u>
<u>4.3.3.2.2</u>	<u>Vazão</u>	<u>107</u>
4.3.4	C-2 vs. C-3	108
4.4	DEMANDA DE ÁGUA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA	109
5	DISCUSSÃO	111
5.1	ESCOLHA DO GCM	111
5.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO	111
5.3	EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	113
5.3.1	Precipitação	113

5.3.2	Temperatura	114
5.3.3	Evapotranspiração.....	114
5.3.4	Vazão	115
5.4	EFEITO DA MUDANÇA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	116
5.5	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	117
6	CONCLUSÃO.....	120
	REFERÊNCIAS.....	123
	APÊNDICE A – MÉDIAS MENSAIS DAS PRECIPITAÇÕES	
	ESTIMADAS.....	142
	APÊNDICE B – MÉDIAS MENSAIS DAS TEMPERATURAS	
	ESTIMADAS.....	146
	APÊNDICE C – MÉDIAS MENSAIS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	
	ESTIMADA PARA C-2	150
	APÊNDICE D – MÉDIAS MENSAIS DA VAZÃO ESTIMADA PARA	
	C-2.....	154
	APÊNDICE E – MÉDIAS MENSAIS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	
	ESTIMADA PARA C-3	158
	APÊNDICE F – MÉDIAS MENSAIS DA VAZÃO ESTIMADA PARA	
	C-3.....	162
	APÊNDICE G – COMPARAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	
	MENSAL MÉDIA C-2 VS. C-3.....	166
	APÊNDICE H – COMPARAÇÃO DA VAZÃO MENSAL MÉDIA	
	C-2 VS. C-3	170
	APÊNDICE I – PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	174
	ANEXO A – RELATÓRIO TÉCNICO 55.....	175

1 INTRODUÇÃO

Apesar de fundamental, não só para o desenvolvimento, mas também para a sobrevivência da sociedade, o manejo dos recursos hídricos em todo o mundo ainda está aquém do necessário. Em muitas regiões, a visão da sociedade e governantes apenas se dirige para este assunto, quando ocorre algum evento extremo, como por exemplo, seca ou inundação (MADANI, 2019).

A água doce é um bem natural finito e sua disponibilidade diminui gradativamente, como mostra o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima – SEEG/OG (2020). Entre os fatores que se relacionam ao aumento de seu consumo e/ou redução da disponibilidade podem ser citados o crescimento populacional, a expansão das fronteiras agrícolas, a urbanização, a degradação do meio ambiente (CECH, 2018; TUCCI, 2005; TUCCI, 2009) e as mudanças climáticas (UNESCO; UN-WATER, 2020).

Segundo o Programa de Avaliação da Água das Nações Unidas - WWAP (2016) 78% dos empregos no mundo dependem da água e, de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) e UN-Water (2020) o consumo de água aumentou seis vezes nos últimos cem anos, crescendo 1% ao ano em 2020. A UNESCO e UN-Water (2020) apresentam, ainda, que atualmente em torno de quatro bilhões de pessoas no mundo sofrem de escassez física severa de água ao menos em um mês por ano, quadro que tende a se agravar devido às mudanças climáticas. Estima-se que, até 2050, 685 milhões de pessoas terão acesso reduzido à água doce em 10% devido às alterações do clima.

Li e Fang (2021) apontam que a intensidade dos efeitos das mudanças climáticas pode variar de acordo com as características de cada região. Esta visão é compartilhada por Dosdogru *et al.* (2020), que apresentam, ainda, a interferência do uso e ocupação do solo em seu trabalho. Para garantir este recurso tão importante é necessário que sejam feitos estudos, revelando os efeitos da ocupação, do clima e futuros usos na disponibilidade hídrica de uma região. Estudos deste porte têm maior eficácia quando tratados na escala da bacia hidrográfica que, de acordo com a Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), deve ser utilizada como unidade de gestão dos recursos hídricos no território brasileiro. Neste contexto, a modelagem e simulação matemática se mostra de grande ajuda, devido à complexidade dos eventos que ocorrem numa bacia. Por meio da modelagem é possível criar cenários

futuros com mudanças no clima, uso e ocupação do solo, entre outros, para se estudar as respostas causadas à hidrologia, ao solo e à qualidade da água. A partir deste conhecimento deve-se buscar formas de organizar a ocupação territorial da região de modo sustentável (UZEIKA, 2009).

Dentre os diversos modelos de simulação em uso, encontra-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), um modelo eco hidrológico para estudos em escala de bacias hidrográficas com longo histórico de utilização (ARNOLD *et al.*, 1998; ARNOLD; FOHRER, 2005; WILLIAMS *et al.*, 2008; QI *et al.*, 2020). Este modelo é extremamente versátil, com diversos componentes hidrológicos e agrônômicos, utilizado por várias agências governamentais e privadas no mundo, servindo como suporte para tomada de decisões sobre problemas relacionados aos usos dos recursos hídricos. Universidades e instituições de pesquisa também têm feito uso desta ferramenta em estudos de ponta sobre quantidade e qualidade da água no ambiente (BRESSIANI *et al.*, 2015; TRANG *et al.*, 2017; PINIEWSKI; BIEGER; MEHDI, 2019; DOSDOGRU *et al.*, 2020; MONTEAGUDO; PALAZÓN; BEGUERÍA, 2020; LI; FANG, 2021). O modelo permite integrar e simular diversos eventos climáticos e processos físicos que ocorrem na bacia (ex: evaporação, infiltração, escoamento superficial etc.), permitindo um maior entendimento as sobre características da bacia, como a vazão ou produção de sedimentos (UZEIKA, 2009; NEITSCH *et al.*, 2011).

1.1 JUSTIFICATIVA

A cidade de Joinville/SC tem seu abastecimento público feito, em sua maioria, a partir da captação das águas da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão - BHRC. Cerca de 75% de toda água utilizada na cidade tem origem desta fonte (ÁGUAS DE JOINVILLE, 2020). Além disso, agricultura e produção industrial também dependem deste manancial. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2021a) os usos industriais representam 95,31% de todas as outorgas de água da BHRC, e o setor é responsável por 25,91% do PIB da cidade. Ações que possam alterar o regime na BHRC tem potencial de causar impacto na disponibilidade hídrica para a cidade. Entre ações de impacto local, pode-se citar a urbanização e alteração do uso e ocupação do solo. Entretanto, é necessário considerar, também, os efeitos

das mudanças climáticas, pois estas também têm potencial de afetar os recursos hídricos locais.

Segundo o IBGE a estimativa populacional total de Joinville e Garuva, municípios em que a BHRC está presente, para o ano de 2021 é de 604.708 e 18.816 pessoas, respectivamente, com tendência de crescimento em ambos (IBGE, 2021a; IBGE, 2021b). Este aumento na população tem efeito direto no uso do solo da região, tanto em ocupação urbana quanto em produção agrícola, como previsto na revisão do Plano Diretor de Joinville, Lei Complementar nº 523 de 04 de janeiro de 2019 (JOINVILLE, 2019). Prever os impactos desse processo no meio natural e na disponibilidade de recursos naturais é fundamental.

Somado à mudança da cobertura do solo, cenários futuros apresentados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2019a), apontam aquecimento global médio de 1,5 a 2 °C até 2030, quando comparado ao período pré-industrial. De acordo com o relatório especial do IPCC (2019a), eventos extremos, secas e chuvas intensas, já têm se tornado mais frequentes em algumas regiões da América do Sul, uma tendência crescente para o futuro. A UNESCO e UN-Water (2020) afirmam que os efeitos das mudanças climáticas se dão em cascata, de modo que com menor precipitação, menor será a umidade do solo, a vazão nos rios e a recarga de aquíferos. Entretanto, a magnitude desse efeito está intrinsicamente ligada às características geológicas, à vegetação, às propriedades do solo e aos usos de cada região (LI; FANG; 2021). Assim, estudos sobre como o ciclo hidrológico pode ser afetado por futuras mudanças se faz necessário (IPCC, 2014).

A utilização do *software* SWAT+, uma variação do *software* SWAT, permite gerar simulações de partes do ciclo hidrológico, e consequentemente, da disponibilidade hídrica, com base em diversas alterações do uso e ocupação do solo e do clima. Estas simulações podem, então, ser utilizadas como base para o Poder Público na tomada de decisões a respeito de diretrizes de expansão urbana e gestão hídrica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Este trabalho teve por objetivo apresentar um panorama sobre a gestão hídrica da BHRC e a avaliar disponibilidade hídrica futura para a cidade de Joinville/SC até a seção a montante da Estação de Tratamento de Água do Cubatão – ETA Cubatão, considerando simulações do impacto da mudança de uso do solo, de vegetação natural para produção agrícola e espaço urbano, somada à previsão de mudanças climáticas.

1.2.2 Específicos

Visando atender ao objetivo geral do trabalho, os objetivos específicos estão apresentados a seguir:

- a) gerar o modelo SWAT para a região;
- b) efetuar a análise de sensibilidade das variáveis, a calibração e a validação do modelo;
- c) estimar a disponibilidade hídrica com base em mudanças do uso e ocupação do solo e alteração climática;
- d) fornecer informações que auxiliem a gestão dos recursos hídricos.

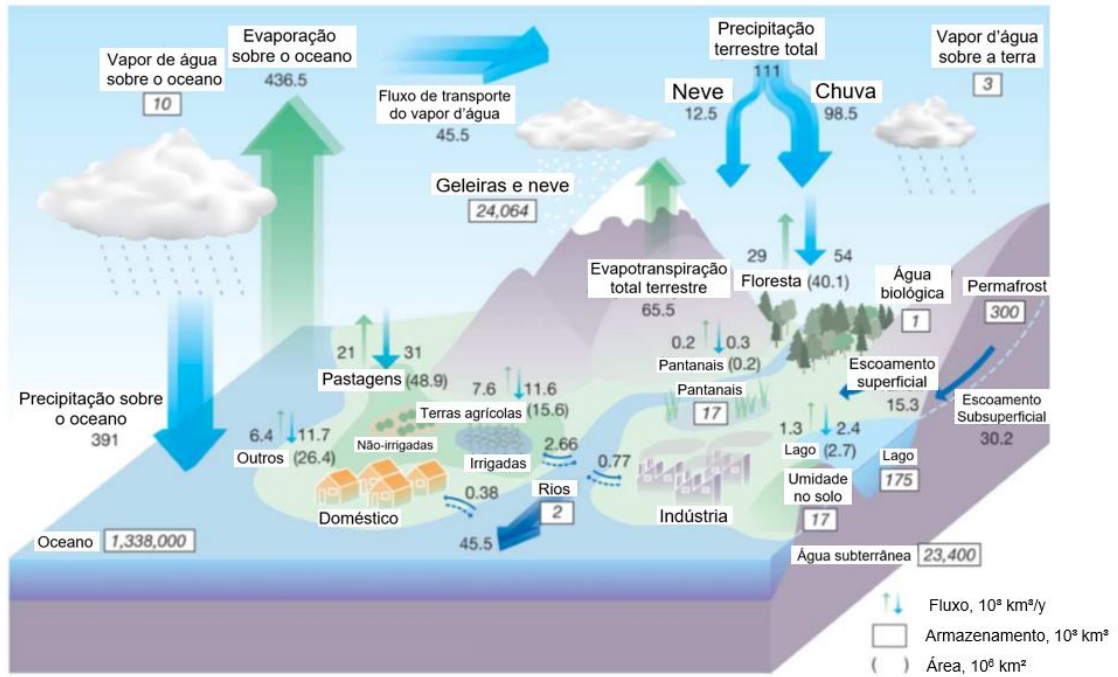
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

De acordo com Chow, Maidment, Mays (1988) e Xavier (2005) o ciclo hidrológico é o ponto central da hidrologia. É um processo contínuo, sem começo ou fim, com diversas etapas, denominadas de processo hidrológico. A Figura 1, adaptada de Oki e Kanae (2006), traz uma representação de todas essas etapas, além dos fluxos transportados e armazenados em nível global, salvo Antártica. Já a Figura 2 exibe um diagrama da interação entre os componentes do ciclo, apresentados a seguir:

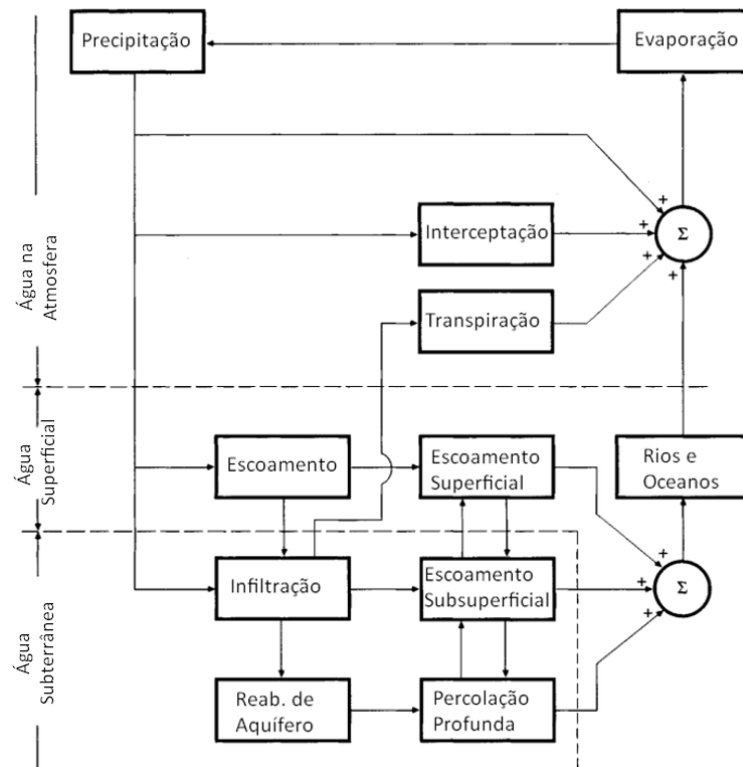
- f) evaporação – é a passagem da água do meio líquido para o gasoso (vapor d'água), tornando-se parte da atmosfera. Ocorre principalmente nos oceanos, lagos e rios, e, em menor intensidade, pelo solo;
- g) transpiração – condiz sobre a perda de água das plantas para a atmosfera. Fator com grande importância em áreas com vasta vegetação;
- h) precipitação – o vapor d'água é transportado e acende, ao ponto em que condensa e precipita sobre a terra e oceano;
- i) escoamento Superficial – a precipitação pode ser interceptada pela vegetação ou atingir diretamente o solo, em ambos os casos, se houver fluxo de água acima do solo, é denotado como escoamento superficial. Parte deste volume, volta para a atmosfera através da evaporação;
- j) infiltração – corresponde à penetração da água da chuva no solo;
- k) escoamento Subsuperficial – corresponde ao movimento da água infiltrada pelas camadas mais superficiais do solo, principal componente na criação e preservação do escoamento em rios, córregos e lagos;
- l) percolação – definida pela movimentação da água dentro do perfil do solo. Pode ser rasa (escoamento subsuperficial) ou profunda, esta última responsável pela recarga dos aquíferos.

Figura 1 – Ciclo Hidrológico e Armazenamento



Fonte: Adaptado de Oki e Kanae (2006).

Figura 2 – Interação dos Componentes do Ciclo Hidrológico



Fonte: Adaptado de Chow, Maidment, Mays (1988).

Cada componente do ciclo hidrológico – precipitação, escoamento superficial, armazenamento de águas superficiais e subterrâneas e evaporação – tem potencial de alterar a qualidade de água de outro componente (TUCCI, 2009). Ainda, pelo entendimento de Chow, Maidment, Mays (1988) e Xavier (2005), aspectos como tipo de cobertura do solo, tipo e parâmetros do solo e intensidade da chuva têm direta influência na qualidade e quantidade de precipitação que infiltra ou escoar no terreno. Dentre as ações que mais afetam o percentual de infiltração da precipitação, encontra-se a urbanização, devido ao alto valor de impermeabilidade que a acompanha (JACOBSON, 2011; JIANG; ZEVENBERNGEN; MA, 2018).

2.1.1 Bacia Hidrográfica

Cada rio possui uma área bem definida que capta toda e qualquer precipitação que ali ocorre, e a direciona para o canal principal, esta área é chamada de área de captação ou de drenagem (GRIBBIN, 2013).

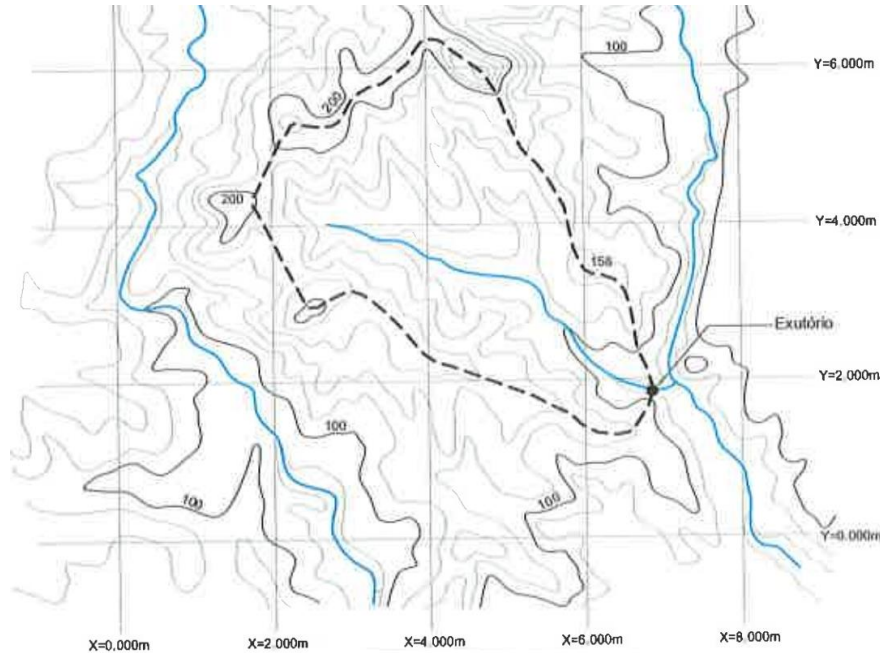
Segundo Gribbin (2013), a borda desta área é denominada divisor de bacias, ou divisor de águas, e é determinado pela topografia da região, através de uma linha imaginária que percorre seus pontos de maior cota.

Desse modo, é de entendimento de Collischonn e Tassi (2008) que:

“A bacia hidrográfica é a área de captação natural dos fluxos de água originados a partir da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. A definição de uma bacia hidrográfica requer a definição de um curso d’água, de um ponto ou seção de referência ao longo deste curso d’água e de informações sobre o relevo da região.”

Um exemplo de uma bacia hidrográfica delimitada sobre um mapa topográfico é apresentado pela Figura 3. É possível, entretanto, que mais de um curso d’água esteja presente, e, neste caso, deve-se determinar qual o rio principal (VIESSMAN; LEWIS; KNAPP, 1989).

Figura 3 – Bacia Hidrográfica Delimitada em Mapa Topográfico



Fonte: Adaptado de Collischonn e Dornelles (2013).

2.1.2 Balanço Hídrico

O balanço hídrico calcula o volume de água em uma determinada área, geralmente é utilizada a bacia hidrográfica. A equação fundamental para o cálculo do balanço hídrico se resume na diferença entre o volume de água que entra na bacia e o volume que sai, como é apresentado pela Equação 1 a seguir (RIGHETTO, 1998).

$$Q_e - Q_s = \Delta V \quad (1)$$

onde Q_e representa o volume de água que entra na bacia [m^3], Q_s o volume de água que sai da bacia [m^3] e ΔV corresponde à variação do volume armazenado [m^3].

Entretanto, segundo o autor, a equação pode se tornar mais detalhada em virtude das informações necessárias e do estudo que será efetuado. Detalhamento sobre as parcelas que compõem cada um dos volumes mencionados são extremamente comuns, um exemplo deste detalhamento é a Equação 2.

$$\Delta V = Pt - Qt - Gt - Et - Tt \quad (2)$$

onde P_t o volume precipitado [m^3], Q_t o volume do escoamento superficial [m^3], G_t o volume do escoamento subterrâneo [m^3], E_t o volume da evaporação [m^3] e T_t o volume da transpiração [m^3].

De acordo com Collischonn e Tassi (2008) é comum determinar o balanço para espaços de tempo específicos. Nestes casos, utiliza-se uma variação da Equação 1, exemplificada para um balanço em escala horária pela Equação 3, a seguir:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - ET - Q \quad (3)$$

onde ΔV é a variação do volume de água armazenado na bacia [m^3], Δt é o intervalo de tempo considerado [s], P é a intensidade da precipitação [m^3/s], ET é a evapotranspiração [m^3/s] e Q é o escoamento [m^3/s].

Ao utilizar períodos de escala anual ou maior, pode-se considerar $\Delta V = 0$, ou seja, volume de entrada na bacia é igual ao volume de saída.

2.1.3 Conceitos Fundamentais

Com base no balanço hídrico de uma bacia, a hidrologia define conceitos que auxiliam o entendimento e gestão das águas. Dentre os principais, estão: o ano hidrológico, o tempo de concentração, a vazão média, a vazão de permanência, a vazão outorgável.

O ano hidrológico é definido como um período contínuo de 12 meses, com contagem iniciada no começo de período chuvoso do local, e finalizada ao término do período seco. Como seu início e fim estão ligados ao clima, diferentes locais podem ter seu ano hidrológico começando e terminando em épocas diferentes (SIMON; PICKBRENNER; MARCUZZO, 2013).

O tempo de concentração, pelo entendimento de Collischonn e Tassi (2008), é o tempo necessário para que toda a bacia (ou área de estudo) contribua para a vazão na seção de saída. Em outras palavras, é o tempo que a partícula de chuva que precipita no ponto mais remoto da bacia leva, escoando superficialmente, até chegar na seção de estudo.

Dentre os aspectos da bacia que mais afetam o tempo de concentração estão a declividade e o curso d'água. A declividade atua principalmente na velocidade do

escoamento, quanto maior for a declividade, maior a velocidade e menor o tempo necessário para efetuar o percurso. Já o curso do rio, extremamente dependente do relevo, afeta o tempo através de seu comprimento e sinuosidade, quanto maior a extensão e/ou sinuosidade, maior o tempo de concentração. O efeito da sinuosidade é observado pelo seu impacto na redução da velocidade de escoamento das águas do rio (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

A vazão de permanência, tem origem na curva de permanência. Esta curva retrata a variação da vazão e sua permanência no tempo, permite conhecer os intervalos de tempo em que determinadas vazões foram igualadas ou superadas. É uma ferramenta essencial para definição dos volumes a serem outorgados e da vazão mínima para manutenção do ecossistema do rio. Alguns exemplos de valores utilizados de vazões de referência são: Q_{95} , Q_{90} , Q_{75} etc., que representam a vazão igualada ou superada em 95, 90 e 75 por cento do tempo, respectivamente (TUCCI; MENDES, 2006).

De acordo com Camara (2003) a vazão de referência é o valor da vazão tida como limite superior utilizável da água de um rio e é com base nela que são atribuídos os valores máximos outorgáveis. No Estado de Santa Catarina, de acordo a Portaria SDS nº 51, de 02 de outubro de 2008 da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico e Sustentável – SDS (2008b), a vazão de referência a ser adotada no Estado de SC é a Q_{98} .

A vazão outorgável é determinada com base na vazão de referência e na vazão mínima necessária para garantir a sobrevivência dos ecossistemas aquáticos (quantitativa e qualitativamente). O volume passível de outorga, apesar de baseado nos itens acima citados, pode variar de acordo com a região. Segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (2011), locais semiáridos como o nordeste do país podem permitir volume de outorgar, percentualmente, maiores que regiões de clima tropical. Para o Estado de Santa Catarina, é considerada a vazão outorgável como 50% da Q_{98} (SDS, 2008b).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é o conjunto de técnicas e procedimentos tecnológicos que visa à representação e coleta de dados da superfície terrestre sem a necessidade de um contato direto. Assim sendo, a informação é obtida por meio de

sensores e instrumentos em geral. As formas mais utilizadas para coleta de informações são por imagens de satélites e por aerofotogrametria (JENSEN, 2009). As imagens de satélite mais utilizados no Brasil são obtidas pelos satélites LandSat, pertencentes à Agência de Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço do Estados Unidos – NASA, CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), uma parceria entre o Brasil e a China e os satélites SCD (Satélite de Coleta de Dados), projetados, construídos e operados por brasileiros (INPE, 2017).

Esta é uma ferramenta bastante utilizada na elaboração de mapas de uso e ocupação do solo (CRÓSTA, 1992), com destaque para, de acordo com Demarchi, Pirolí e Zimback (2011), o planejamento ambiental. Dentre seus usos citam-se o gerenciamento de recursos hídricos e bacias hidrográficas, monitoramento de cobertura vegetal, planejamento da ocupação agrícola, entre outros (DEMARCHI; PIROLI; ZIMBACK, 2011).

Segundo Fonseca (2000), uma grande vantagem no uso de imagens de sensoriamento remoto está na temporalidade das informações, juntamente com seu relativo baixo custo, quando se busca informações de uso e cobertura do solo.

Dentre os produtos do sensoriamento remoto, está a criação de mapas temáticos através da classificação de uma imagem segundo temas. Essa classificação diz respeito a associar cada pixel da imagem utilizada a um “rótulo” descrevendo um objeto real (vegetação, solo etc.). Assim, são associados valores numéricos à cada pixel, referentes à reflectância dos materiais que o compõe, seguido de um agrupamento dos pixels de mesmo valor em classes. Além do mapa temático, é possível obter o mapa topográfico da imagem utilizada ou seu Modelo Digital de Elevação (MDE). Tanto os mapas temáticos quanto os topográficos ou MDE fazem uso de diferentes bandas do espectro eletromagnético, através de leituras dos diferentes tempos e comprimentos de ondas medidos. Essas informações, após devidamente processadas, geram os mapas em questão (JENSEN, 2009).

2.3 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A gestão dos recursos hídricos, de acordo com a Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), foi pensada de modo a ser compartilhada e descentralizada. A partir desta lei, a bacia hidrográfica é a unidade territorial de gestão dos recursos hídricos. Ela institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema

Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Nesta lei foram previstos seis instrumentos de gestão a serem implementados: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos predominantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação a municípios, e; o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Na esfera federal, é criado o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), responsável por arbitrar conflitos sobre o uso de água em bacias federais e por estabelecer as diretrizes necessárias para implementar a estrutura institucional e os instrumentos contidos na PNRH.

Na esfera estadual, os Concelhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERH) atuam de forma análoga ao CNRH, porém ao nível estadual. As Instituições Estaduais de Gestão de Recursos Hídricos (IEGRH) são responsáveis por implementar as diretrizes estabelecidas pelo CERH. Por fim, os Comitês de Bacias e as Agências de Águas atuam diretamente na área das bacias, independentemente da divisão territorial política (BRASIL, 1997; VEIGA; MAGRINI, 2013).

2.4 ALTERAÇÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

As mudanças de uso e ocupação do solo (UOS) são aquelas alterações na cobertura do terreno de uma região. As mudanças de UOS, juntamente com as mudanças climáticas, são tidas como as principais formas de alterar o comportamento hidrológico de uma região (NEUPANE; KUMAR, 2015; GOMES *et al.*, 2021; BRIONES; ELLA; BANTAYA, 2016). Santos *et al.* (2021) apontam que a mudança de UOS pode ter impacto direto na vazão média e na produção de sedimentos de uma bacia. Outros estudos como de Gomes *et al.* (2021) e Briones, Ella e Bantayan (2016) ainda apresentam sua influência na evapotranspiração e escoamento subterrâneo, respectivamente.

Segundo XIONG (2014), o tipo de alteração de UOS mais observado nas últimas décadas foi a ocupação urbana e expansão das fronteiras agrícolas. Este tipo de mudança tende a gerar maiores escoamentos superficiais (GOMES *et al.*, 2021; BRIONES; ELLA; BANTAYA, 2016; SANTOS *et al.*, 2021), menor valor de evapotranspiração (GOMES *et al.*, 2021) e maior produção de sedimentos (BRIONES; ELLA; BANTAYA, 2016).

2.5 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De acordo com o IPCC (2018) e a Organização Mundial de Meteorologia -WMO (2019) há consenso na comunidade científica que ações antropogênicas têm influenciado o clima mundial e a emissão de gases do efeito estufa (GEE) têm aumentado a temperatura média global. Índícios apontam que a concentração de gás carbônico, metano e óxido nitroso estão em seus níveis mais altos dos últimos 800.000 anos (IPCC, 2014; IPCC, 2018; WMO, 2019). WMO (2019) aponta que a temperatura média do planeta aumentou 0,9°C desde o século XIX, que o maior aquecimento ocorreu nos últimos 35 anos e as cinco leituras mais quentes já registradas ocorreram após 2010. IPCC (2018) relata que mesmo que os níveis de emissão GEE atinjam a meta do Acordo de Paris, a temperatura média global ainda ultrapassará em mais de 1,5°C a temperatura pré-industrialização até 2030.

Uma das áreas da ciência mais afetadas por essas alterações no clima é a hidrologia. Os efeitos da mudança hidrológica serão severos no futuro interferindo não apenas no ciclo d'água, mas também em diversos aspectos sociais e econômicos (UNESCO; UN-Water, 2020). IPCC (2018) informa que a expectativa é a ocorrência de maiores volumes de evaporação da água do solo devido ao aumento de temperatura. Esse efeito pode ser amenizado nas áreas com aumento na precipitação, entretanto a tendência ainda aponta para maiores perdas e, como consequência, menores volumes de águas nos rios, principalmente em regiões com expectativa de redução da precipitação.

O WWAP (2016) aponta a alta dependência da sociedade em relação à disponibilidade de água e, segundo as previsões de mudanças climática a maior parte das regiões no mundo irá sofrer com redução da disponibilidade hídrica (UNESCO; UN-WATER, 2020). Esse efeito será evidente em setores como a agricultura e a indústria, maiores consumidores de água no mundo, chegando ao ponto de limitar o crescimento econômico e ameaçando oportunidades de emprego (WWAP, 2016). Porém, o consumo humano também irá sofrer as consequências das mudanças climáticas, com maiores valores de evaporação, menos água estará disponível para captação, seja nos rios, lagos ou de captação em poços (UNESCO; UN-WATER, 2020). IPCC (2018) ressalta, ainda, que frequência e intensidade de eventos extremos tendem a aumentar, prejudicando os recursos hídricos disponíveis. Isto ocorre por disseminação dos poluentes em eventos de alta precipitação, ocasionando ou não

inundações, por meio do aumento da concentração de poluentes em períodos de secas etc.

De acordo com a UNESCO e UN-Water (2020) os efeitos das mudanças climáticas a nível global apresenta a tendência de aumento de temperatura e redução de precipitação. Porém IPCC (2019b) ressalva que cada região pode apresentar cenários distintos, até opostos, a essa tendência. Alguns exemplos de estudos sobre os efeitos de mudanças climáticas em regiões específicas podem ser vistos em Li e Fang (2021), Zhao *et al.* (2019), Dosdogru *et al.* (2020) e Monteagudo, Palzón e Beguería (2020).

2.6 SWAT / SWAT+

O *software* SWAT foi desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola – ARS do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA. De acordo com Neitsch *et al.* (2011) este programa é uma ferramenta de avaliação de solo e água em escala de uma bacia hidrográfica. Foi desenvolvido para oferecer um prognóstico do impacto das práticas de gestão do solo sobre recursos hídricos, além da produção de sedimentos e aplicações de produtos químicos em plantações dentro da bacia hidrográfica.

O modelo é baseado na física do local, e não utilizando equações de regressão para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída. Para isto, faz uso de diversas informações específicas sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão de uso do solo. Os processos físicos associados à movimentação hídrica, movimentação sedimentar, crescimento da colheita, ciclo de nutrientes etc., são calculados diretamente pelo modelo SWAT usando os dados de estrada (NEITSCH *et al.*, 2011).

Segundo os autores, o SWAT trabalha em um modelo de tempo contínuo, ou seja, um modelo de produção em longo prazo. Desse modo, não é possível simular detalhadamente eventos únicos, como é o caso de propagação de cheias.

A ferramenta SWAT deve ser utilizada paralelamente com um *software* SIG (Sistema de Informação Geográfica). De acordo com qual *software* será utilizado, a ferramenta recebe uma nomenclatura diferenciada, indicando sua compatibilidade. A versão SWATPlus, ou apenas SWAT+, foi elaborada de modo a ser compatível com o *software* QGIS, de versão 3.0 ou superior.

2.6.1 Histórico

O modelo SWAT tem origem no modelo SWRRB (Simulador para Recursos Hídricos de Bacias Rurais), um modelo de análise contínua de dados em intervalos de tempo regulares, desenvolvido para simular descargas de fontes difusas em bacias hidrográficas. Entretanto, também incorpora características de vários modelos do ARS (ARNOLD *et al.*, 1990). Dentre os modelos que mais contribuíram estão: o CREAMS (Produtos Químicos, Escoamento e Erosão dos Sistemas de Gestão Agrícola), um modelo de simulação de impacto da gestão do solo na água, sedimentos, nutrientes e pesticidas (KNISEL, 1980); o GLEAMS (Efeito das Descargas Subterrâneas os Sistemas de Gestão Agrícola) um modelo de fontes difusas, focado em descarga subterrâneas de pesticidas e nutrientes (LEONARD *et al.*, 1987); o EPIC (Calculador de Impacto Erosão-Produtividade) originalmente com objetivo de simular o impacto da erosão na produtividade de colheita, que evoluiu para um modelo abrangente de gestão agrícola e produção (WILLIAMS *et al.*, 1984).

De acordo com Neitsch *et al.* (2011), visto a dificuldade do modelo SWRRB trabalhar com grandes bacias, foi criada, no início da década de 90, a primeira iteração da ferramenta SWAT, que permitiu a divisão da bacia em diversas sub-bacias e conectando resultados de análises destas de forma automática.

Com o passar dos anos a ferramenta SWAT passou a receber diversas atualizações e melhorias. Dentre estas citam-se: a utilização de Unidades de Resposta Hidrológicas – HRUs, novas opções de gerenciamento de plantações, melhoria no cálculo dos ciclos hidrológicos, implantação do gerador climático, previsão climática e transporte de sedimentos, substâncias químicas e biológicas. Paralelamente aos avanços da capacidade de simulação da ferramenta, houve ainda, avanços em sua interface, tornando-a mais simples e compatível com maior gama de softwares, principalmente de georreferenciamento (NEITSCH *et al.*, 2011).

A versão SWAT+ surgiu através da reformulação do código utilizado no SWAT, visando maior facilidade de utilização e implementação de melhorias futuras.

2.6.2 Principais Aspectos

“Não importa qual o tipo de problema estudado com o SWAT, o equilíbrio hídrico é a força motora por trás de tudo que acontece na Bacia Hidrográfica.

Para diagnosticar precisamente a movimentação dos pesticidas, sedimentos ou nutrientes, o ciclo hidrológico, conforme simulado pelo modelo, deve estar de acordo com o que está acontecendo na bacia hidrográfica.” (NEITSCH *et al.*, 2011, p. 27).

Desse modo, a simulação hidrológica da bacia, no SWAT, é feita através de sub-bacias, definidas pela topografia do local em estudo. Esta divisão da área em estudo em seções menores proporciona melhores resultados nas simulações, pois permite definir características e parâmetros individuais para cada sub ou microbacia, Neitsch *et al.* (2011). Os parâmetros e características mencionados são definidos com base nas seguintes categorias: Clima; Unidade de Resposta Hidrológica (HRU); Açude/Pântano; Água Subterrânea; Canal Principal; e Drenagem. A categoria HRU representa as áreas na sub-bacia formada pelo mesmo tipo, uso e ocupação do solo e combinação de gestão.

A simulação da hidrologia da bacia pode ser separada em duas etapas distintas. A primeira, o ciclo hidrológico do terreno, onde é analisada a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas são descarregadas no canal principal da sub-bacia. E a segunda, a fase de propagação do ciclo hidrológico, ou seja, o transporte dos sedimentos, nutrientes etc. pelos diferentes canais da bacia até o exutório (NEITSCH *et al.*, 2011).

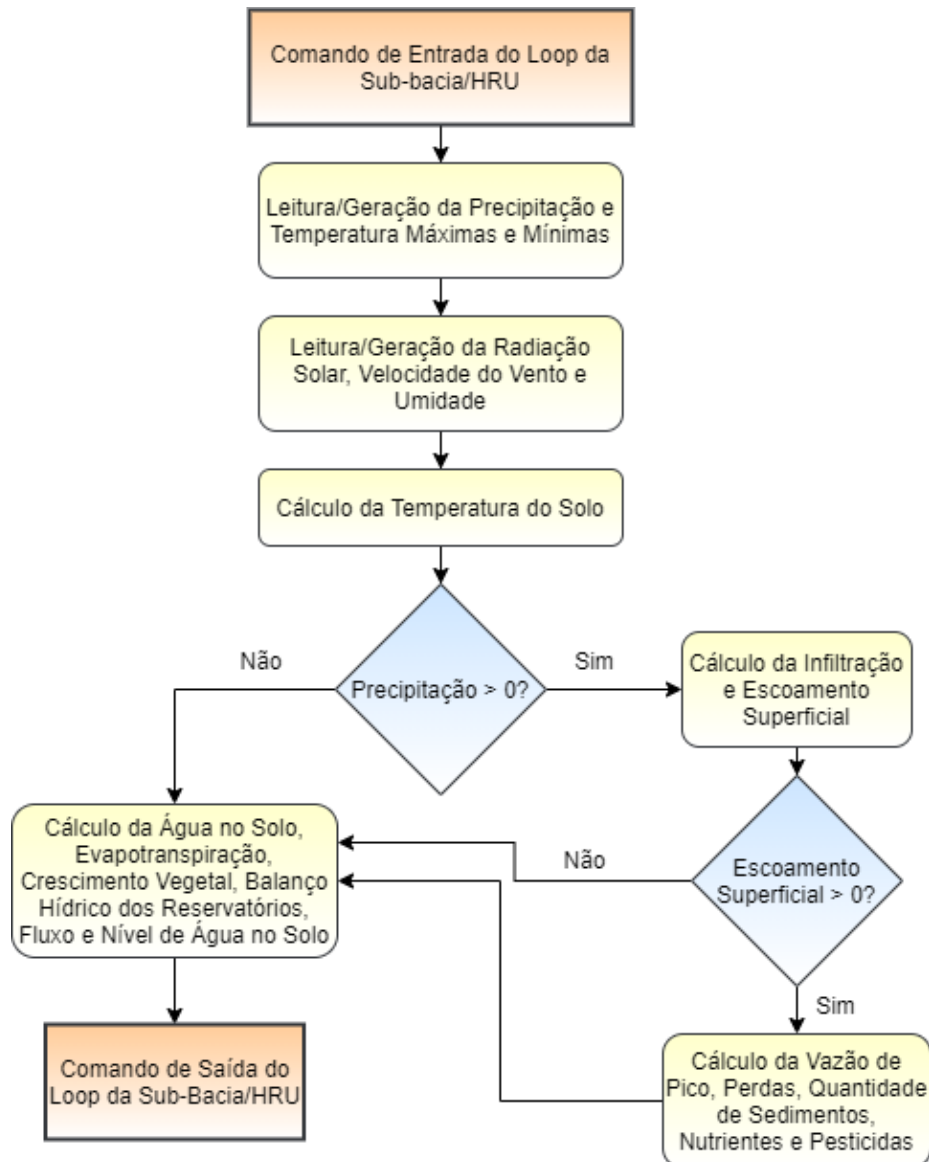
2.6.2.1 Fase Terrestre do Ciclo Hidrológico

A Figura 4 apresenta a sequência geral de processos usados pelo SWAT na modelagem da etapa terrestre do ciclo Hidrológico, baseado na Equação 4.

$$SW_1 = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (4)$$

onde SW_1 é a quantidade final de água no solo [mm], SW_0 é a umidade do solo inicial no dia i [mm], t é o tempo [dias], R_{day} é a quantidade precipitada no dia i [mm], Q_{surf} é o volume escoado superficialmente no dia i [mm], E_a é a evapotranspiração no dia i [mm], W_{seep} é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i [mm] e Q_{gw} é a quantidade de retorno do fluxo no dia i [mm].

Figura 4 – Processos da Modelagem da Fase Terrestre



Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011).

De acordo com Neitsch *et al.* (2011) o modelo divide a área total a ser estudada (denominada bacia) em sub-bacias. Cada uma destas com pelo menos uma HRU própria, ou seja, o cálculo da fase terrestre do ciclo hidrológico é efetuado pelo menos uma vez para cada sub-bacia. Ademais, são determinados valores de evapotranspiração distintos para cada tipo de produção agrícola e tipo de solo. Similarmente, o escoamento superficial é obtido individualmente para cada HRU, e estes valores são, então, utilizados para determinar o escoamento total da bacia como um todo.

As informações de entradas necessárias para utilização do modelo são apresentadas a seguir.

2.6.2.1.1 Clima

O SWAT necessita de uma grande quantidade de informações para desenvolver um modelo hidrológico, estas informações são divididas em dados diários e dados mensais. Quanto aos dados diários, estes resumem-se às médias ou somas diárias dos seguintes fatores: precipitação, temperatura do ar, velocidade do vento, radiação e umidade relativa do ar. Os valores mensais são as médias ou somas dos mesmos fatores citados, referentes a cada mês de todos os anos analisados (SILVA, 2015). Estes valores, mensais e diários, podem ser inseridos no programa a partir de observações, como às de estações meteorológicas, ou através do Gerador Climático do próprio *software*, com base em informações fornecidas pelo usuário (NEITSCH *et al.*, 2011). A partir destas variáveis, o programa também efetua o cálculo da temperatura do solo para a simulação. As variáveis climáticas necessárias são apresentadas pelo Quadro 1.

Quadro 1 – Variáveis Climáticas Solicitadas pelo Modelo

Parâmetros	
WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus)
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus)
WELEV	Altitude da estação meteorológica (metros)
RAIN_YRS	Número de anos dos dados meteorológicos observados utilizados para o cálculo de RAINHHMAX
TMPMX	Temperatura máxima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPMN	Temperatura mínima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da máxima temperatura no mês
TMPSTDMN	Desvio padrão da mínima temperatura no mês
PCPMM	Média da precipitação no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia ⁻¹)
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação diária no mês
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês
RAINHHMX	Precipitação máxima de meia hora no mês (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C)
WNAV	Velocidade do vento médio diário no mês (m.s ⁻¹)

Fonte: Adaptado de Silva (2015) e Neitsch *et al.* (2011).

De acordo com Baldissera (2005) e Neitsch *et al.* (2011) a variável RAIN_YRS não deve ser menor que 10 anos. E as estações meteorológicas a serem utilizadas devem estar contidas na mesma isozona da área em estudo.

O SWAT utiliza uma cadeia de Markov de primeira ordem para definir o dia como úmido ou seco, sendo o dia úmido aquele em que houve precipitação de, no mínimo, 0,1 mm (NEITSCH *et al.*, 2011). As variáveis PR_W(1) e PR_W(2), são determinadas, então, pelas Equações 5 e 6, respectivamente:

$$PR_W(1) = \frac{D_{W/D}}{D_D} \quad (5)$$

$$PR_W(2) = \frac{D_{W/W}}{D_W} \quad (6)$$

onde $D_{W/D}$ representa o número de dias úmidos seguidos de dias secos no mês, D_D número de dias secos no mês, $D_{W/W}$ número de dias úmidos seguidos de dias úmidos no mês e D_W número de dias úmidos no mês.

Quanto à radiação solar média, esta é determinada, segundo Neitsch *et al.* (2011), pela Equação 7:

$$\mu rad_{mon} \cdot days_{tot} = \mu W rad_{mon} \cdot days_W + \mu D rad_{mon} \cdot days_D \quad (7)$$

onde μrad_{mon} consiste na radiação solar diária no mês em questão [MJ/m²d], $days_{tot}$ número de dias no mês, $\mu W rad_{mon}$ radiação solar diária média no mês em dias úmidos [MJ/m²d], $days_W$ dias úmidos no mês, $\mu D rad_{mon}$ radiação solar diária média no mês em dias secos [MJ/m²d] e $days_D$ dias secos no mês.

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura na qual a pressão de vapor atmosférica é igual à pressão de vapor de saturação do ambiente e pode ser descrita pela Equação 8 (BALDISSERA, 2005). Ainda, de acordo com Baldissera (2005), a pressão de vapor de saturação é obtida pela Equação 9 e a pressão de vapor atmosférica pela Equação 10, a seguir:

$$DEWPT = \frac{237,3 \cdot \log\left(\frac{e}{0,6108}\right)}{7,5 - \log\left(\frac{e_0}{0,6108}\right)} \quad (8)$$

$$e_0 = 0,6108 \times 10^{\left[\frac{7,5 \cdot Tar}{237,3 + Tar} \right]} \quad (9)$$

$$UR_{\%} = \frac{e}{e_0} \quad (10)$$

onde $UR_{\%}$ expressa a umidade relativa média do ar no mês em questão, Tar é a temperatura média do ar [°C], e é a pressão atmosférica na temperatura em questão [kPa], e_0 é a pressão de saturação na mesma temperatura [kPa] e $DEWPT$ é a temperatura média do ponto de orvalho do mês.

Segundo Neitsch *et al.* (2011) a velocidade do vento só é utilizada na simulação caso o usuário opte por utilizar a equação de Penman-Monteith no cálculo da evapotranspiração potencial. Os valores referentes à velocidade do vento podem ser fornecidos pelo usuário ou podem ser gerados com base na Equação 11:

$$\mu_{10m} = \mu wnd_{mon} \cdot (-\ln(rnd_1))^{0,3} \quad (11)$$

onde μ_{10m} é a velocidade média do vento em determinado dia [m/s], μwnd_{mon} é a velocidade média mensal do vento [m/s] e rnd_1 é um número aleatório entre 0,0 e 1,0 [kPa].

2.6.2.1.2 Hidrologia

A hidrologia trabalha com os volumes de água armazenados na vegetação, no solo ou de escoamento até o canal. O volume armazenado na vegetação pode evapotranspirar, enquanto a água que infiltra no solo tem possibilidade de evaporar ou percolar. O próprio SWAT calcula estes volumes com base nas características inseridas, considerando, inclusive, a fase de crescimento da vegetação. Porém o usuário pode cadastrar limites máximos de armazenamento, como limite de volume armazenado nas copas das árvores (NEITSCH *et al.*, 2011).

O SWAT permite estimar o escoamento superficial por dois métodos: Procedimento de Número de Curva SCS (SCS-CN); Método de Infiltração Green & Ampt. Neste trabalho será utilizado o primeiro dos dois métodos, este apresentado a seguir.

A equação de escoamento de SCS é um método empírico para estimar o escoamento superficial com base no Número de Curva (CN2) (USDA, 2004). Este parâmetro, CN, diz respeito as características do tipo de solo, da cobertura presente e das condições de umidade antecedentes em diferentes tipos e usos de solos (USDA, 2004; AJMAL *et al.*, 2015). Entretanto, pesquisadores vêm apontando limitações para o método, como sua grande dependência em uma única variável (CN2), além de gerar resultados menos precisos em bacias maiores de 250 km² (AJMAL *et al.*, 2015; PONCE; HAWKINS, 1996). De acordo com os autores ambas as limitações estão ligadas à variação geográfica de CN2, por este motivo no presente trabalho optou-se em dividir a bacia hidrográfica em estudo em um maior número de sub-bacias, permitindo a calibração de CN2 independentemente para cada divisão.

De acordo com Neitsch *et al.* (2011) a equação de número SCS é dada pela Equação 12. Esta equação fornece a estimativa do escoamento superficial no caso de a precipitação ser maior que as perdas iniciais (armazenamento superficial, interceptação e infiltração pré-escoamento), ou seja, precipitação maior que o solo local pode reter.

$$Q_{Surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{R_{day} - I_a + S} \quad (12)$$

onde Q_{Surf} apresenta o valor do escoamento superficial [mm H₂O], R_{day} a intensidade da precipitação no dia [mm H₂O], I_a as abstrações iniciais [mm] e S é o parâmetro de retenção.

A variável I_a é tida como sendo $0,2S$. Deste modo, a equação de curva SCS pode ser reescrita pela Equação 13. Onde o parâmetro S é determinado pela Equação 14.

$$Q_{Surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{R_{day} + 0,8S} \quad (13)$$

$$S = \frac{25400}{CN2} - 254 \quad (14)$$

onde $CN2$ é o número de curva, obtido de valores tabelados em função do tipo, uso e condições hídricas do solo. As tabelas em questão podem ser encontradas no relatório técnico número 55 da *Conservation Engineering Division* (1986), no Anexo A.

A evapotranspiração no SWAT poder ser obtida utilizando de três métodos distintos: o Método de Penmann-Monteith, que requer dados diários de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento; o Método de Priestley-Taylor, que requer dados diários de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa; e o Método de Hargreaves, necessitando apenas os valores diários de temperatura do ar. A equação do Método de Hargreaves utilizada no SWAT+ para o cálculo da evapotranspiração potencial é apresentada pela Equação 15 (NEITSCH *et al.*, 2011; HARGREAVES; SAMANI, 1985).

$$\lambda E_o = 0,0023 \cdot Ra \cdot (T_{mx} - T_{mm})^{0,5} \cdot (T_{av} + 17,8) \quad (15)$$

onde λ é o calor latente de vaporização [MJ/kg], E_o é a evapotranspiração de potencial estimada [mm/dia], Ra é a radiação extraterrestre [MJ/m²/d], T_{mx} é a temperatura máxima do ar em determinado dia [°C], T_{mm} é a temperatura mínima em do ar determinado dia [°C] e T_{av} é a temperatura média do ar em determinado dia (°C).

Após determinada a evapotranspiração potencial, o SWAT+ efetua o cálculo da evapotranspiração efetiva. Nesse processo é considera a evaporação da água de chuva interceptada pela vegetação, a sublimação e evaporação da água do solo. Detalhes de cada uma destas etapas são encontrados no tópico 2.2.3 de Neitsch *et al.* (2011).

A percolação, no SWAT, é calculada para cada camada de solo no perfil. Esta só ocorrerá caso a umidade do solo exceda a capacidade de umidade do campo para a camada em questão e se a camada inferior não estiver saturada (NEITSCH *et al.*, 2011). Desse modo a quantidade de água disponível para percolação é dada pela Equação 16 e a quantidade de água que passa de uma camada para outra, subjacente, é fornecida pela Equação 17:

$$\begin{aligned} SW_{ly,excess} &= SW_{ly} - FC_{ly} & SW_{ly} > FC_{ly} \\ SW_{ly,excess} &= 0 & SW_{ly} \leq FC_{ly} \end{aligned} \quad (16)$$

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right]\right) \quad (17)$$

onde $SW_{ly,excess}$ representa o volume de água drenável na camada do solo em determinado dia [mm H₂O], SW_{ly} é a umidade da camada do solo no mesmo dia [mm H₂O], FC_{ly} é a capacidade de armazenamento de água da camada do solo em campo [mm H₂O], $W_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola no dia [mm H₂O], Δt é a duração do intervalo de tempo utilizado [horas] e TT_{perc} é o tempo de duração da percolação [horas];

O tempo total gasto para a percolação é considerado único para cada camada (NEITSCH *et al.*, 2011), e é obtido pela Equação 18:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ty}}{K_{sat}} \quad (18)$$

onde SAT_{ly} é a quantidade de água na camada quando esta está saturada [mm H₂O] e K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada da camada [mm.h⁻¹].

2.6.2.1.3 Cobertura do Terreno / Crescimento Vegetal

O SWAT utiliza um modelo de crescimento vegetal único para simular os tipos de cobertura de terreno, diferenciando, apenas entre plantas perenes e anuais pela consideração da presença de raízes no solo e características de crescimento. Vegetação perenes são consideradas tendo raízes sempre presentes e sem crescimento nos meses de inverno. Já para as plantas anuais, o crescimento é considerando entre o período de plantio até a colheita (NEITSCH *et al.*, 2011).

Para o crescimento da vegetação o modelo se baseia na ideia de a vegetação crescer apenas enquanto a temperatura do ambiente estiver acima da temperatura de base de cada espécie. Além da influência da temperatura no crescimento, a duração do dia também interfere na taxa de crescimento. Nos períodos do ano, em que a duração do dia é mais curta, como outono e inverno, a vegetação entra em estado de dormência, onde não há crescimento, salvo plantas de estação quente. No caso das árvores, durante o período de dormência, o índice de área foliar é definido como o

mínimo, e a variação deste valor é convertida em resíduo orgânico. Para as plantas perenes 10% da biomassa é convertida em resíduo durante essa etapa. Apenas plantas anuais de estação fria não tem parte de sua biomassa convertida.

2.6.2.1.4 Práticas de Gestão

As práticas de gestão dizem respeito às definições que o usuário pode/deve inserir no modelo. Elas estão divididas em três grandes grupos: Práticas Agrícolas; Manejo Hídrico; Ações em Áreas Urbanizadas (NEITSCH *et al.*, 2011).

O primeiro grande grupo trata dos aspectos ligados ao manejo geral das plantações em cada HRU. Dentre os aspectos analisados estão a época de início do cultivo das lavouras, tempo de colheita, tipo e método de fertilização e pesticidas e características da lavoura.

O segundo grande grupo define, de acordo com Neitsch *et al.* (2011), as práticas de gestão hídrica da HRU. Nesta etapa devem ser descritas práticas como a existência de irrigação, se esta é feita de modo automático ou manual. Deve-se descrever qual o método de drenagem que prevalece na HRU, nos casos de existência de cultivos que necessitem submersão total ou parcial, como a rizicultura, deve-se indicar a presença de depressões para armazenamento da água necessária. Ademais, são tratados, ainda, aspectos da transferência de água, adicionando ou removendo água da bacia, e de consumos, apenas remoção de água.

Já o terceiro, e último, grupo aborda os aspectos da gestão das áreas urbanizadas. Este foca na produção de sedimentos e do escoamento superficial, ambos baseados no nível de impermeabilização do solo e sua conectividade à um sistema de drenagem. O valor do escoamento é determinado pela curva SCS ou pelo método de Green & Ampt. Já a quantidade de sedimentos gerada pode ser determinada pelo método de regressão desenvolvido pelo Departamento de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos – USGS (DRIVER; TASKER; 1988) ou através de mecanismos de acumulação e lavagem de partículas (HUBER; DICKINSON, 1988).

2.6.2.2 Propagação entre Canais

Enquanto o item “Fase Terrestre do Ciclo Hidrológico” apresenta o que ocorre no SWAT entre a entrada de água na bacia até esta chegar nos canais, o item

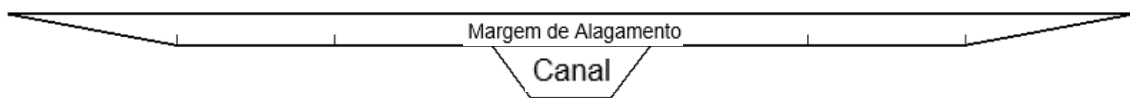
“Propagação”, também chamada de fase aquática, é responsável por apresentar os mecanismos e aspectos do SWAT da comunicação entre os diferentes canais (NEITSCH *et al.*, 2011). Nesta etapa são tratados os processos de movimentação de massas d’água, sedimento, nutrientes e pesticidas (estes três últimos não serão abordados pois não fazem parte do estudo).

2.6.2.2.1 Perfil dos Canais

Segundo Neitsch *et al.* (2011) no SWAT todos os canais são considerados trapezoidais. O usuário pode definir a largura (superficial), profundidade, inclinação da parede e número de Manning para cada canal, considerando estes com capacidade máxima. A largura de fundo é calculada pelo SWAT assumindo, inicialmente, que a parede do canal tem inclinação 2H:1V. Caso a largura de fundo calculada resulte em zero ou um valor negativo, o programa define a largura de fundo como metade da largura superficial e calcula um novo valor para a inclinação da parede.

Para cada canal, o SWAT também acrescenta uma margem de alagamento, como mostra a Figura 5. A base desta margem é considerada possuindo largura cinco vezes superior a base do canal e a inclinação da parede é de 4H:1V (NEITSCH *et al.*, 2011).

Figura 5 – Perfil Margem de Alagamento SWAT



Fonte: Adaptado de Neitsch *et al.* (2011).

O volume e velocidade de escoamento para cada seção do canal (com ou sem a margem de alagamento) são obtidos pelas equações de Manning, expressas pelas Equações 19 e 20, respectivamente:

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} \cdot R_{ch}^{\frac{2}{3}} \cdot slp_{ch}^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (19)$$

$$v_{ch} = \frac{R_{ch}^{\frac{2}{3}} \cdot slp_{ch}^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (20)$$

onde q_{ch} é a vazão [m³/s], A_{ch} é a área molhada [m²], R_{ch} é o raio hidráulico [m], slp_{ch} é a inclinação da parede do canal [m/m], n é o coeficiente de Manning do canal e v_{ch} é a velocidade da água [m/s].

2.6.2.2.2 Método do Armazenamento Variável

Este método, desenvolvido por Williams (1975) e considerado neste trabalho, é uma das opções presentes no SWAT para efetuar o direcionamento das águas nos canais. O direcionamento para cada segmento de canal obedece à Equação 21:

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (21)$$

onde V_{in} representa o volume de entrada [m³], V_{out} representa o volume de saída [m³] e ΔV_{stored} representa o volume armazenado [m³].

Ao analisar a Equação 21 em função do tempo, esta pode ser escrita como a Equação 22:

$$\frac{q_{in,1} + q_{in,2}}{2} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\Delta t} - \frac{q_{out,2}}{2} \quad (22)$$

onde Δt representa o intervalo de tempo considerado [s], $q_{in,1}$ representa a taxa de entrada no início do intervalo [m³/s], $q_{in,2}$ representa a taxa de entrada no final do intervalo [m³/s], $q_{out,1}$ representa a taxa de saída no início do intervalo [m³/s], $q_{out,2}$ representa a taxa de saída no final do intervalo [m³/s], $V_{stored,1}$ representa o volume armazenado no início do intervalo [m³/s] e $V_{stored,2}$ representa o volume armazenado no final do intervalo [m³/s].

De acordo com Neitsch *et al* (2011), o tempo de translação é calculado pela divisão do volume de água no canal pela taxa de fluxo, representado pela Equação 23:

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} = \frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad (23)$$

onde TT representa o tempo de translação [s], V_{stored} representa o volume armazenado [m³], q_{out} representa a taxa de fluxo de saída [m³/s].

Ainda de acordo com os autores a relação entre o tempo de translação e o coeficiente de armazenamento pode ser expresso pela Equação 24. E, a partir desta, têm-se a Equação 25, apresentando o volume de saída de cada segmento de canal ao término de um intervalo de tempo.

$$SC = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \quad (24)$$

$$V_{out,2} = SC \cdot (V_{in} + V_{stored,1}) \quad (25)$$

2.6.2.2.3 Perdas por Evaporação

As perdas por evaporação são obtidas, segundo Neitsch *et al.* (2011), pela Equação 26:

$$E_{ch} = coef_{ch} \cdot E_0 \cdot L_{ch} \cdot W \cdot fr_{\Delta t} \quad (26)$$

onde E_{ch} é a evaporação diária [m³], $coef_{ch}$ é o coeficiente de ajuste, definido pelo usuário, E_0 é a evaporação potencial [mm.dia⁻¹] (ver Equação 12), L_{ch} é o comprimento do canal [km], W é a largura superficial do canal [m] e $fr_{\Delta t}$ é a divisão do tempo de concentração pelo período analisado.

2.6.2.2.4 Armazenamento nas Margens

O volume de água que é armazenado nas margens pelo canal é determinado pela Equação 27. Entretanto, dependendo das condições de umidade,

evapotranspiração etc. esta água pode retornar ao canal. O volume que retorna ao canal é calculado pela Equação 28 (NEITSCH *et al.*, 2011).

$$bnk_{in} = tloss \cdot (1 - fr_{trns}) \quad (27)$$

$$V_{bnk} = bnk \cdot (1 - \exp[-\alpha_{bnk}]) \quad (28)$$

onde bnk_{in} é quantidade de água que é armazenada na margem [m³]. $tloss$ são as perdas de transição do canal [m³], obtidas pela Equação 29, fr_{trns} é a fração das perdas de transmissão para o aquífero profundo, V_{bnk} é o volume de água que retorna ao canal da margem [m³], bnk é a quantidade de água na margem [m³] e α_{bnk} é a constante de retorno.

$$tloss = K_{ch} \cdot TT \cdot P_{ch} \cdot L_{ch} \quad (29)$$

onde K_{ch} é a constante hidráulica do canal [mm/h], TT é o tempo de concentração [h], P_{ch} é o perímetro molhado [m] e L_{ch} é o comprimento do canal [km].

2.6.2.2.5 Balanço Hídrico do Canal

Ao considerar todas as etapas da propagação de vazão mencionadas anteriormente, o SWAT calcula o volume de água no canal, aplicando a Equação 30 em cada seção do mesmo (NEITSCH *et al.*, 2011).

$$V_{stored,2} = V_{stored,1} + V_{in} - V_{out} - tloss - E_{ch} + div + V_{bnk} \quad (30)$$

onde $V_{stored,2}$ o volume de cada canal no fim do período [mm³], $V_{stored,1}$ é o volume de cada canal no início do período [mm³], V_{in} é o volume de água que entra no canal durante o período [m³], V_{out} é o volume de água que sai do canal durante o período [m³], $tloss$ é o volume de perda de água por transmissão [m³], E_{ch} é a evaporação no dia [m³], div é o volume de água adicionado ou removido por desvios [m³] e V_{bnk} é o volume de água de retorno da margem [m³].

2.6.3 Aplicações do SWAT

Inúmeras pesquisas avaliaram a modelagem SWAT em diversos cenários e aspectos. Tan e Yang (2020), em seus estudos na Malásia, apresentam a eficácia do modelo de acordo com a quantidade de dados de entrada, avaliando a performance do mesmo em frente à escassez de informações. Os autores buscaram relacionar a precisão do modelo gerado com base na quantidade e localização de estações meteorológicas além de avaliar o impacto de dados faltantes nas séries históricas utilizadas.

Pradhan, Tingsanchali e Shrestha (2020), na Tailândia, deram maior foco na simulação com base no volume de vazão. Foi avaliado a performance da simulação hidráulica do SWAT quando comparado à modelagem por Redes Neurais, observando que, apesar de ter bons resultados no geral, o modelo SWAT se destacou em simulações de baixas vazões.

Na Suíça, Zarrineh, Abbaspour e Holzkämper (2020), procuraram simular o impacto das mudanças climáticas nos serviços ambientais. Foram relacionados os modelos climáticos de curto e longo prazo como fonte de dados para o SWAT. Os autores elaboraram, deste modo, projeções sobre o que poderá ocorrer em relação ao volume das vazões, a quantidade de nutrientes e poluentes nos rios, o nível de erosão e o possível impacto destas mudanças na produtividade das lavouras. O trabalho apresenta um aumento na produtividade de inverno de trigo e milho para um futuro próximo e redução para um futuro distante, além de maior concentração de nutrientes na água devido a redução do nível médio das vazões.

Seguindo a mesma linha de Zarrineh, Abbaspour e Holzkämper (2020) e Touseef *et al.* (2020) também elaboraram um estudo dos efeitos das mudanças climáticas utilizando o SWAT. Seu foco na avaliação da vazão dos rios da bacia em estudo durante as estações do ano para diversos cenários de previsão climática. Os autores observaram que a estimativa é de redução do volume, principalmente no inverno, com variações de 10-30% na vazão entre os cenários.

O uso do modelo no Brasil tem se tornado popular a partir do final dos anos de 1990 (BRESSIANI *et al.*, 2015), com mais de 100 estudos publicados entre 1999 e 2015. Em sua maioria, estes estudos foram feitos nas regiões sul e sudeste do país, e, quase a metade apresentaram apenas resultados hidrológicos. De acordo com Bressiani *et al.* (2015) este cenário tem ligação direta com a quantidade e qualidade

dos dados de entrada necessários para o modelo, visto que na maioria dos casos não há informações o suficiente para a utilização do modelo.

Para amenizar o problema da falta de dados, surgiram pesquisas como a de Pontes *et al.* (2016), que buscou avaliar a eficiência de uma modelagem SWAT em uma bacia não monitorada com base nos parâmetros calibrados de uma bacia de grande monitoramento. Neste estudo, Pontes *et al.* (2016) modelaram a bacia do sistema Cantareira, em São Paulo, com o SWAT. E transferiram os parâmetros calibrados para a bacia do Rio Jaguari. Obtendo resultados satisfatórios na modelagem desta segunda bacia.

Trabalhos como de Veiga, Guandique e Nardordocci (2019) continuam a tendência de estudos hidrológicos, avaliando o impacto de diferentes usos e ocupação do solo na quantidade e qualidade da água em uma região. Outros estudos como de Gomes *et al.* (2021), trazem informações adicionais, além do impacto do uso e ocupação, fazem uso, ainda, de informações de mudanças climáticas. São abordados esses temas para a série histórica utilizada por eles e, também, em cenários climáticos futuros. Novamente avaliando o impacto das mudanças na hidrologia.

Apesar do aumento da popularidade e abrangência do uso de modelos hidrológicos como o SWAT, ainda há pouco interesse de sua aplicação na tomada de decisões no Brasil. Um estudo elaborado por Hamel *et al.* (2020) mostra a pouca confiança que donos de terras e representantes públicos (tomadores de decisão) têm sobre o planejamento hídricos e a utilização de modelos hidrológicos para a cidade de Camburiú.

2.7 SWAT+ EDITOR / SWAT+ TOOLBOX

O SWAT+ Editor é uma ferramenta do programa SWAT+ utilizada para modificar as centenas de parâmetros do modelo hidrológico, é responsável, ainda, por apresentar os resultados das simulações. É nesta ferramenta que o usuário deve informar quais os métodos e considerações a serem utilizadas na elaboração do modelo SWAT, os principais métodos e considerações estão apresentados no item 2.3. Além de permitir que o usuário efetue a calibração e validação manualmente, através da alteração direta de arquivos .txt (TECH, 2021).

Complementarmente ao SWAT+ Editor têm-se o *software* SWAT+ Toolbox, ainda em desenvolvimento, visando simplificar as etapas de análise de sensibilidade,

calibração e validação do modelo para o usuário. Este *software* utiliza os arquivos de saída do SWAT+ Editor e permite a calibração manual ou automática, além de fornecer quatro métodos de análise de sensibilidade (SWAT, 2021).

2.7.1 Análise de Sensibilidade

A qualidade e eficiência da calibração de um modelo está ligada à quantidade e à correta seleção dos parâmetros a serem ajustados Huang *et al.* (2014). Por este motivo os autores sugerem a execução de uma análise de sensibilidade pré-calibração. O SWAT+ Toolbox permite a realização desta análise de sensibilidade através de quatro métodos distintos: Sobol; Amplitude de Fourier; Design de Equilíbrio Randomizado da Amplitude de Fourier; Medição Momento-Independente Delta (SWAT, 2021). A seguir é apresentado, simplificada e, o método de Sobol, utilizado no presente trabalho.

O método de Sobol consiste numa análise de sensibilidade global baseada na variância utilizando Índices de Sensibilidade Totais. Este método considera o efeito principal de variação além da interação de parâmetros (SOBOL', 1990; SALTELLI; TARANTOLA; CAMPOLONG, 2000). Complementando, Frey, Mokhtari e Zheng (2004, pg. 121, tradução nossa) apresenta a seguinte explicação:

“O método de Sobol define índices de sensibilidade com base na decomposição da variância de saída em termos devido a um único efeito de entrada (índices de primeira ordem) ou efeitos conjuntos de mais de uma entrada.”

Os índices de primeiras ordens gerados pelo método podem ser utilizados para avaliar a linearidade de um modelo. Para modelos totalmente lineares, a soma dos índices de sensibilidade de primeira ordem é igual a um. Em modelos com interação significativa entre parâmetros a soma destes índices é próxima a um e, modelos altamente não-lineares apresentam soma dos índices de primeira ordem próxima a zero. Por este motivo caso os índices de primeira ordem se apresentarem baixos, deve-se trabalhar com os índices de sensibilidade totais (FREY; MOKHTARI; ZHENG, 2004).

2.7.2 Calibração

A calibração pelo *software* SWAT+ Toolbox é feita pelo algoritmo *Dynamically Dimensioned Search* (DDS), desenvolvido por Tolson e Shoemaker (2007) para modelagem de bacias hidrográficas. O DDS é um algoritmo de pesquisa global simples, estocástico, heurístico e baseado em solução única, com objetivo de encontrar uma solução globalmente ótima dentro de um limite máximo de iterações especificado pelo usuário (TOLSON; SHOEMAKER, 2007; BEHRANGI *et al.*, 2008; TOLSON *et al.*, 2009).

De acordo com Tolson e Shoemaker (2007) o DDS apresenta ótimos resultados para calibrações com menos de 10000 iterações sem a necessidade de muita robustez computacional, alcançando bons resultados de forma rápida. Isto é possível devido à forma como o algoritmo atua. Inicialmente o DDS executa a calibração globalmente e ao se aproximar do número máximo de iteração sua busca passa a ser cada vez mais local (TOLSON; SHOEMAKER, 2007; BEHRANGI *et al.*, 2008).

Este algoritmo exige que o usuário indique quantas iterações serão realizadas, quais os parâmetros a serem calibrados, o tipo de alteração que cada parâmetro sofrerá e seus limites, superior e inferior (TOLSON; SHOEMAKER, 2007). Os autores não sugerem uma estimativa clara quanto à quantidade de iterações recomendadas, entretanto nos testes apresentados em seu trabalho observam-se bons resultados em modelos a partir de 500-1000 iterações. Este valor está ligado diretamente à complexidade do modelo e da quantidade de parâmetros, sendo necessária a avaliação de acordo com os resultados da análise de sensibilidade HUANG *et al.*, 2014).

Segundo Tolson e Shoemaker (2007) a alteração dos parâmetros durante a calibração pode ser feita de três maneiras:

- a) substituição – O valor do parâmetro em questão é alterado em toda área de estudo para o valor informado;
- b) valor Relativo – O parâmetro tem seu valor alterado do original de acordo com o acréscimo ou decréscimo fornecido;
- c) percentual – O valor do parâmetro é alterado segundo o percentual informado.

É de entendimento de Abbaspour *et al.* (2015) que se deve tomar cuidado na escolha de cada forma de alteração dos parâmetros, pois cada opção tem efeito único no modelo gerado. A alteração do tipo “Substituição”, por exemplo, que substitui o valor do parâmetro em questão em toda área de estudo não é recomendada para parâmetros espaciais como o “CN2”, intrinsicamente ligado ao tipo de uso do solo.

2.7.3 Estatísticas de Precisão

2.7.3.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe – NSE

O NSE é um dos métodos mais utilizados para avaliar o desempenho de uma simulação SWAT (ARNOLD *et al.*, 2012). Sua função é indicar a precisão dos resultados da simulação quando comparados aos valores de medições no período de estudo (ABBASPOUR, 2015) e pode ser obtido através da Equação 31.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^M(\theta) - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (31)$$

onde NSE é o coeficiente de Nash-Sutcliffe, n é o número de observações, y_i^M valor simulado do parâmetro θ no tempo i , y_i é o valor observado no tempo i e \bar{y}_i é a média aritmética dos valores observados.

2.7.3.2 Coeficiente de Determinação – R^2

O coeficiente de determinação é utilizado, de modo geral, para avaliar a dispersão dos dados do modelo, e é determinado através da Equação 32. No SWAT é utilizado para determinar a correlação entre os valores simulados e os medidos, podendo apresentar valor entre zero, indicando que não há correlação, e 1, correlação perfeita. Apesar de muito utilizado, não é a avaliação estatística mais recomendada (ARNOLD *et al.*, 2012; KRAUSE; BOYLE; BASE, 2005). É de entendimento de Krause, Boyle e Base (2005) que um ponto fraco do R^2 é, justamente, apenas quantificar a dispersão dos dados do modelo. Os autores ressaltam que caso a simulação gere respostas sub ou superestimadas em escala relativamente constante, o valor do coeficiente de determinação poderá ser tido como satisfatório, mesmo que

os valores gerados não representem a realidade. Por este motivo é recomendado que o R^2 seja utilizado paralelamente com outra estatística que supra essa deficiência.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i^M - \bar{y}_i^M)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i^M - \bar{y}_i^M)^2} \quad (32)$$

onde n é o número de observações, y_i é o valor observado no tempo i , \bar{y}_i é a média aritmética dos valores observados, y_i^M valor simulado e \bar{y}_i^M é a média aritmética dos valores simulados.

2.7.3.3 Tendência Percentual – P_{bias}

O P_{bias} apresenta se a simulação está subestimando ou superestimando os valores de saída, ou seja, representa a tendência média destes serem menores ou maiores que os valores observados. Valores de P_{bias} negativos indicam que a simulação está gerando valores superestimados, enquanto valores positivos apontam valores subestimados. De acordo com Gupta, Sorooshian e Yapo (1999) quanto maior próximo o P_{bias} for de zero, melhor é o ajuste da simulação à medição.

Para o cálculo do P_{bias} se utiliza a Equação 33.

$$P_{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^M)}{\sum_{i=1}^n y_i} \cdot 100 \quad (33)$$

onde P_{bias} é a tendência percentual [%], y_i é o valor do evento observado e y_i^M é o valor do evento simulado.

2.7.3.4 Valores Satisfatórios

Para Moriasi *et al.* (2007), valores de NSE maiores de 0,50 e P_{bias} entre $\pm 25\%$ podem ser considerados satisfatórios em uma simulação SWAT, enquanto NSE e R^2 maiores que 0,75 podem ser considerados “muito bons”. Já Abbaspour (2022) comenta que não existem valores fixos de NSE e R^2 para definir se uma simulação é ou não eficiente. Tanto Abbaspour (2022) quanto Tan e Yang (2020) expressam a

visão de que a avaliação se o modelo é, ou não, satisfatório tem ligação direta com a qualidade dos dados de entrada, como veracidade das séries históricas e posição e quantidade de estações de medição.

3 METODOLOGIA

A elaboração deste trabalho se deu ao longo de 7 etapas, primeiramente, foi necessário obter todas as informações a serem utilizadas na modelagem. Estas estão divididas em dados geográficos (MDE, mapa de Uso e Ocupação do solo e mapa de Solos) e dados climáticos (Precipitação, Temperatura e Vazão).

Possuindo os dados mencionados, a etapa seguinte consistiu na elaboração do modelo hidrológico. E para tal, foram criadas as HRUs, a partir dos dados geográficos e dos dados meteorológicos, ambos no *software* SWAT+.

Após o modelo criado, a terceira etapa se resume a efetuar uma análise de sensibilidade das variáveis. Visto que, pelo imenso número de variáveis utilizadas pelo *software*, é inviável estudar a incerteza de todas (JEONG *et al.*, 2010).

Em seguida, para a quarta etapa, foi feita a calibração do modelo. É nesta etapa que os resultados apresentados pelo SWAT+ foram comparados aos valores de medições reais, para um mesmo período, e suas variáveis adaptadas para melhor representar a realidade.

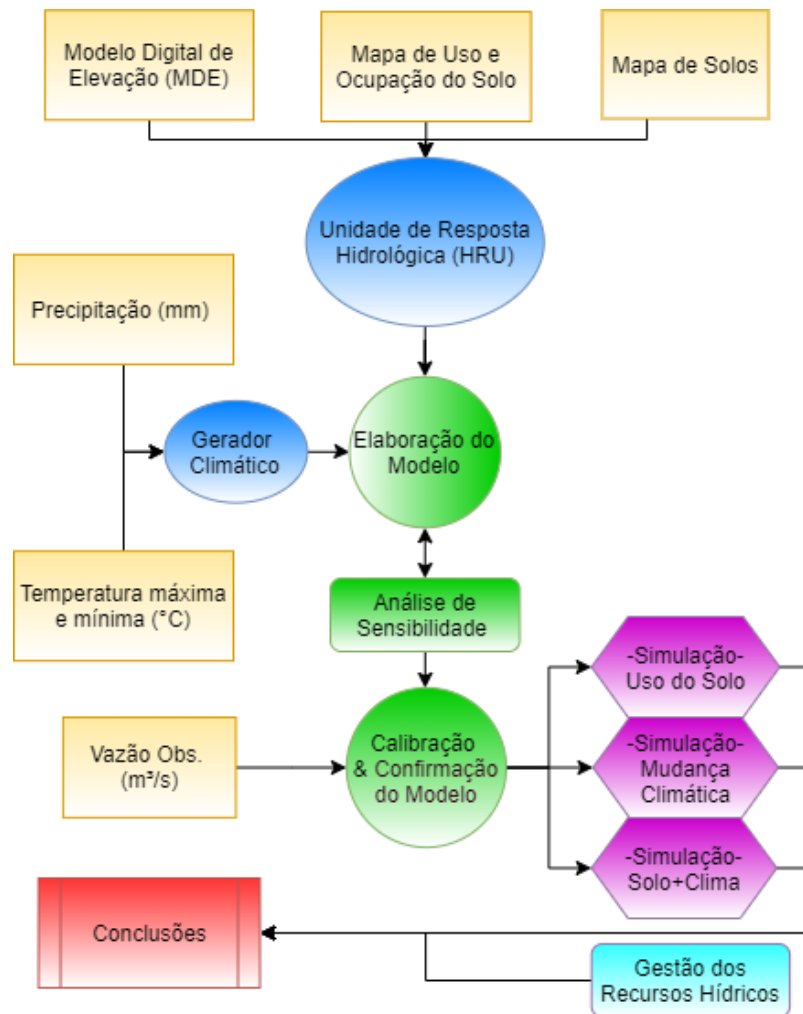
A quinta etapa consistiu em confirmar o modelo, ou seja, verificar se está de acordo com a realidade. Para isto, foram fornecidos dados de entrada, para um intervalo de tempo diferente do utilizado para calibração, e foi comparada a saída do *software* com os valores medidos em campo para o mesmo período.

A sexta, e penúltima, etapa diz respeito às simulações, divididas em três cenários. Nesta etapa foram inseridos no *software* as informações de previsão climática e a mudança de uso e ocupação. E, a partir destas foram gerados os balanços hídricos da BHRC assumindo apenas mudança no uso e ocupação, apenas alteração climática e o efeito combinado. Cada um destes cenários foi subdividido, ainda, em valores médios mensais para o ano hidrológico completo, apenas para a época úmida e apenas para a época seca.

A última etapa procurou avaliar o impacto que as mudanças simuladas podem exercer sobre os recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão. Abordando, ainda, características da gestão dos recursos hídricos na BHRC.

Um fluxograma das etapas é apresentado pela Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma das Etapas do Trabalho



Fonte: O Autor.

3.1 SOFTWARES UTILIZADOS

Os *softwares* utilizados no presente estudos são apresentados a seguir:

- QGIS 3.16.4 Hannover– Sistema de Informação Geográfica de Código Aberto, desenvolvido pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), Chicago, EUA (QGIS, 2021). Utilizado na edição de todos os mapas necessários para o estudo, além da elaboração do mapa de uso e ocupação do solo;
- Interface SWAT+ 1.2.2 para QGIS – desenvolvido pelo USDA (SWAT, 2021). Utilizado para a elaboração do modelo;
- SWAT+ Editor 2.0.4– Interface gráfica do SWAT+ desenvolvido pelo USDA (SWAT, 2021). Utilizado na elaboração e edição de informações do modelo;

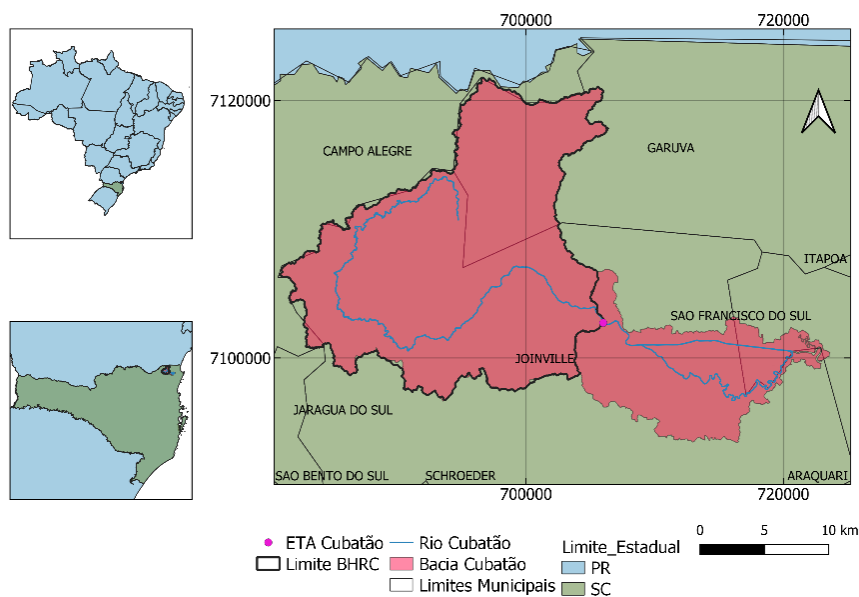
- d) SWAT+ Toolbox 0.7.6 – *Software* de código aberto para assistência na análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT+ em desenvolvimento por James Celray Chawanda, *Vrije Universiteit Brussel*, Bélgica (SWAT, 2021).

3.2 ÁREA DE ESTUDO

3.2.1 Localização

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão - BHRC a montante da ETA Cubatão, representada na Figura 7. A BHRC está localizada na região nordeste do estado de Santa Catarina, entre as Longitudes 680.000E e 725.000E e as Latitudes 709.000S e 713.000S, *datum* Sirgas 2000 Zona 22S. E, de acordo com o Comitê Cubatão Cachoeira Joinville – CCJ (2019), possui a área de 492 km², dos quais cerca de 80% pertencem ao município de Joinville e 20% ao de Garuva. Optou-se por utilizar apenas a região da bacia que tenha contribuição no volume de água medido e passível de captação pela ETA Cubatão. Assim, a área avaliada neste trabalho foi de, aproximadamente, 370 km², cerca de 75% da área total da bacia.

Figura 7 – BHRC e Área de Estudo



Fonte: Adaptado de CCJ (2018a e 2018b).

A nascente de seu canal principal, do qual a bacia recebe o nome, está localizada no Planalto Norte na região da Serra Queimada, a cerca de 1200 m acima do nível do mar. Porém essa cota sofre rápida redução ao chegar na Serra do Mar, quando o Cubatão passa por uma queda d'água de mais de 300 m. Apesar de ser relativamente curto, pouco menos de 90 km, antes de chegar à foz, o Canal do Palmital com cota de 0 m. O Rio Cubatão atravessa a zona rural de Joinville, onde foi construída uma das estações de captação e tratamento de água da cidade (CCJ, 2018a; CCJ, 2018b; GONÇALVES; ZANOTELLI; OLIVEIRA, 2006).

Na década de 1950 foi construída uma barragem de derivação dividindo do percurso do rio em dois, também representado na Figura 7, com 11,8 km de extensão e 40 metros de largura com o objetivo de desviar parte da água do rio evitando inundações na região de Pirabeiraba e Estrada da Ilha. Posteriormente, o canal e a barragem de derivação tiveram suas secções ampliadas em mais 12 metros, aumentando a capacidade de escoamento (FATMA, 2002).

De acordo com CCJ (2017) a área de vegetação nativa, em 2016 era de 429 km², 87,6%, de toda a área da Bacia do Cubatão. E, segundo a Secretaria de Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável – SEPUD (2017), quase 53 mil pessoas moravam nos bairros em que a BHRC está localizada no ano de 2016, com estimativa de ultrapassar 56 mil pessoas até 2020. Estes valores consideraram os bairros: Zona Industrial Norte, Pirabeiraba, Rio Bonito, Bom Retiro, Jardim Paraíso, Jardim Sofia, Dona Francisca e Vila Cubatão.

Grande parte a BHRC é tida como área de preservação ou utilização controlada, pela prefeitura municipal de Joinville. Estas áreas são denominadas Área Rural de Preservação Ambiental – ARPA e Área Rural de Utilização Controlada – ARUC, de acordo com a revisão do Plano Diretor de Joinville, Lei Complementar nº 523 de 04 de janeiro de 2019 (JOINVILLE, 2019). No mesmo documento, são apresentadas diretrizes de expansão urbana da cidade, presentes na Lei de Ordenamento Territorial – LOT, Lei Complementar nº 470 de 09 de janeiro de 2017 (JOINVILLE, 2017), que prevê ocupação limitada da região norte, na qual a área de estudo está contida. Entretanto, mesmo com permissão limitada de ocupação, de acordo com a Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente – SAMA (2016), residências ilegais são comuns na região, o que pode ter efeito direto no comportamento hidrológico da BHRC.

A BHRC é responsável pelo abastecimento de 75% do município de Joinville (Águas de Joinville, 2020). O PIB da cidade era de R\$ 30.785.682.000,00 em 2018 (IBGE, 2021). Devido a sua localização, o setor industrial da cidade, responsável por 25,91% do PIB da cidade em 2018, utiliza, quase que exclusivamente, a água do Rio Cubatão. Além do abastecimento urbano e industrial, o setor agrícola também está presente na BHRC, com cerca de 6% da bacia pertencendo a este setor (Univille/MPF, 2016).

3.2.2 Clima na Área de Estudo

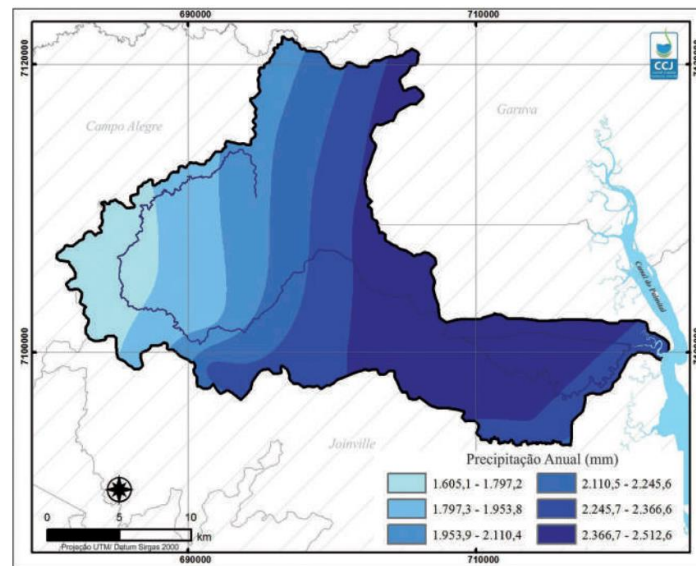
A cidade de Joinville, onde localiza-se parte da BHRC, tem seu clima classificado em Cfa de acordo com a classificação de Köppens, ou seja, mesotérmico úmido sem estação seca definida (ALVARES *et al.*, 2013). De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2014) o ano hidrológico de Joinville, e consequentemente da BHRC, inicia no dia primeiro de setembro e termina em 31 de agosto.

A BHRC é a bacia que apresenta a segunda maior precipitação média anual do município, com distribuição fortemente desigual entre o planalto e a planície (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Mello, Kohls e Oliveira (2015) apontam que a média de precipitação, entre os anos de 1979 e 2008, foi de 1605 a 1797 mm no planalto contra 2366 a 2512 mm na planície. Segundo os autores, essa diferença ocorre devido à Serra do Mar, que funciona como uma barreira orográfica. Os maiores índices pluviométricos são a barlavento da serra enquanto os menores a sota-vento, como pode ser observado pela distribuição de precipitações para a bacia na Figura 8.

Registros mensais de precipitação revelam que, no geral, o verão é mais chuvoso e com precipitações mais intensas e de curta duração, com os meses de dezembro, janeiro e fevereiro chegando a 35% de todo volume precipitado no ano. Já os meses de junho, julho e agosto (inverno) representam a época seca, com cerca de 16% da precipitação anual (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Quanto à temperatura, BHRC apresenta média de 22,9 °C, para o período de 1998-2018 (ANA, 2021). Esta medição apresenta dados apenas da planície, ao considerar o planalto, esperam-se valores menores.

Figura 8 – Distribuição de Precipitações para a Bacia do Cubatão (1979-2008)



Fonte: Oliveira *et al.* (2017).

3.2.3 Solo na Área de Estudo

De acordo com a SEPUD (2020) e Uberti (2011) os solos da região podem ser divididos em duas categorias, quanto sua origem: Terras Altas e Terras Baixas.

Nas Terras Altas o solo tem fortes características autóctones, ou seja, originado da rocha matriz local. São predominantes, portanto, Argissolo Amarelo, Neossolo Litólico e Cambissolo Háplico. Em depósitos arenosos encontram-se, ainda, Neossolo Quartzênico, Espodossolo Hidromórfico e Planossolo (SEPUD, 2020; UBERTI, 2011).

Em contrapartida, as Terras Baixas apresentam características alóctones, em outras palavras, solos com origem de outros locais e formados por sedimentação. Há, desse modo, ocorrência de Gleissolo Melânico e Háplico em relevos planos com má drenagem e Cambissolo Háplico quando bem drenados. Ainda, em locais com domínio de sedimentos recentes de origem orgânica, tem-se a presença de Organossolo. Em terrenos angulares à montanhosos das Terras Baixas, apresentam solos predominantemente de classificação Cambissolo Háplico (SEPUD, 2020; UBERTI, 2011).

Observa-se ainda a presença de Solos Indiscriminados de Mangue em algumas bacias hidrográficas da região, como o caso da BHRC.

3.2.4 Uso e Ocupação do Solo

O uso e ocupação do solo, assim como tipo do solo da BHRC pode ser separado entre as Terras Altas e Terras Baixas, acima e abaixo da Serra Dona Francisca. Na primeira, Terras Altas, concentra-se a Mata Atlântica e Ecossistema de Floresta Ombrófila Mista, com exploração focada em silvicultura, bovinocultura e ovinocultura. Enquanto as Terras Baixas, apresenta, novamente o Bioma de Mata Atlântica, porém com o Ecossistema de Floresta Ombrófila Densa. A exploração desta, está focada na bananicultura, plantas ornamentais, palmeiras e bovinocultura (SEPUD, 2020; UBERTI, 2011). Quanto às áreas de ocupação urbana, estas se concentram nas terras baixas (Univille/MPF, 2016).

3.2.5 Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos em Santa Catarina e Demandas e Disponibilidade Hídrica

Por ser uma bacia de domínio estadual, a BHRC tem a gestão de suas águas sujeita à Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Santa Catarina - PERH (SANTA CATARINA, 1994). Nesta política o único instrumento previsto é a outorga de direito de uso de água, que tem valores de referência diferentes dependendo da bacia hidrográfica. Além da PERH existem vários outros documentos entre portarias e resoluções que dispõem sobre o assunto, o que dificulta o processo de gestão.

De acordo com a Portaria SDS nº 51, de 02 de outubro de 2008, a vazão de referência para o Estado de Santa Catarina é a Q_{98} , e a máxima vazão outorgável por seção será 50% da Q_{98} (SANTA CATARINA, 2008b). Porém, de acordo com a portaria SDS nº 38, de 06 de novembro de 2006, exclusiva para a BHRC, a vazão de referência é a Q_{95} , sem estabelecer claramente qual o limite outorgável (SANTA CATARINA, 2006). Desta forma, utilizou-se para fins de análise de dados os limites da Portaria nº 51, para verificação de disponibilidade hídrica, ou seja, 50% da Q_{98} na Foz do Rio Cubatão (50% de 4,404 m³/s) (Silva, 2019).

As demandas atuais dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na BHRC são: abastecimento público e industrial, agricultura, aquacultura, diluição de esgotos, mineração e pecuária. Das outorgas obtidas (http://www.cadastro.aguas.sc.gov.br/sirhsc/conteudo_visualizar_dinamico.jsp?idEmpresa=12&idMenu=715&idMenuPai=512), 95,31% correspondem ao uso industrial

(SANTA CATARINA, 2008a). Para determinar a relevância dos recursos hídricos da BHRC na produção econômica de Joinville foi comparado o PIB do setor industrial da cidade com a vazão outorgada pelo mesmo.

3.3 ELABORAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT

O modelo hidrológico utilizado no presente estudo foi gerado de modo a fornecer o balanço hídrico da área de estudo. A elaboração de um modelo hidrológico SWAT consiste em criar as HRUs, abastecer o banco de dados do *Software* SWAT+ para fazer uso do Gerador Climático do programa e definir os parâmetros/métodos utilizados. Cada etapa mencionada é apresentada com maiores detalhes a seguir.

3.3.1 Criação das HRUs

Para a gerar as HRUs são necessários três conjuntos de informações: o MDE, o mapa de Solos e o mapa de Uso e Ocupação.

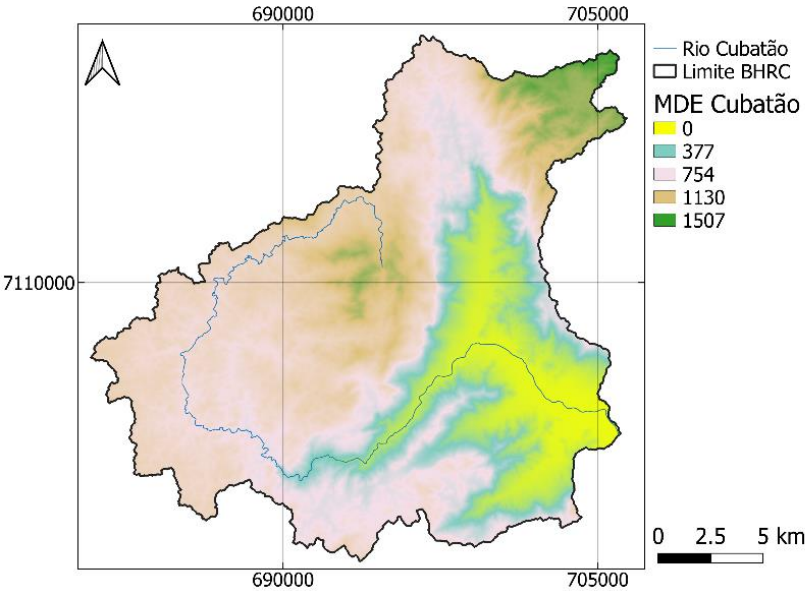
3.3.1.1 *Modelo Digital de Elevação*

O MDE consiste na representação matemática da distribuição espacial do terreno, ou seja, representa a elevação área de estudo. Para este estudo foi utilizado o MDE da SDS (2012), com resolução de 5 m e projeção SIRGAS 2000 / UTM zona 22S. O MDE foi limitado para compreender apenas a região a montante da ETA Cubatão da bacia hidrográfica em questão, para maior velocidade de processamento. A Figura 9 apresenta uma ilustração do MDE utilizado, assim como o limite da bacia e a posição da ETA Cubatão.

Carregar o MDE no programa representa a primeira etapa na geração das HRUs. Com o MDE carregado, foi utilizada a função de delineamento automático do SWAT+ para gerar os canais e córregos do local. Após estes estarem definidos, foi adicionado o exutório da área de estudo como sendo a localização da ETA Cubatão, para avaliar a disponibilidade hídrica da bacia visto que o limite de captação depende da vazão do rio. Ao considerar o exutório junto à ETA têm-se o valor da vazão próximo do ponto de captação.

Foi necessário informar ao SWAT+ como o modelo deve lidar com a água de inundação. Neste trabalho optou-se por gerar margens de inundação no próprio programa através do método de inversão do MDE, opção oferecida pelo *software*.

Figura 9 – Modelo Digital de Elevação da Área de Estudo



Fonte: Adaptado de SDS (2012).

3.3.1.2 Mapa de Solos

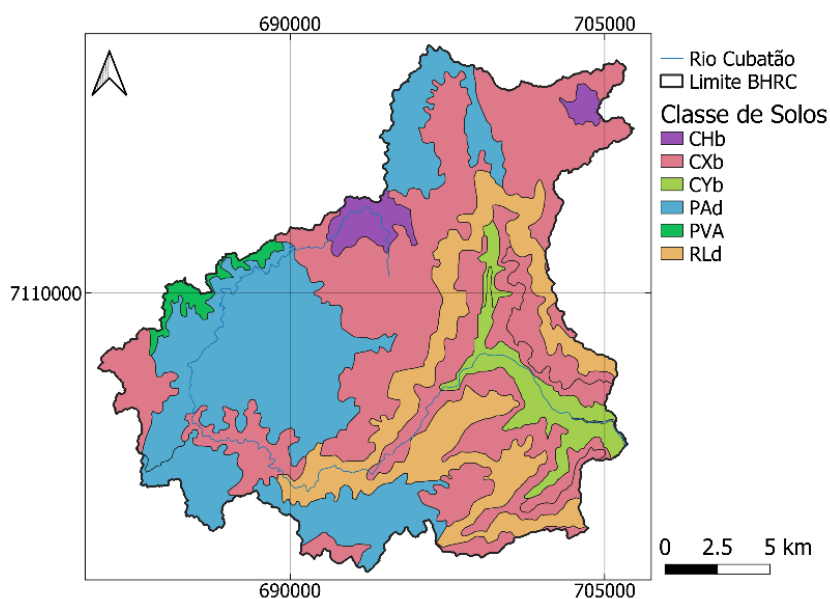
A segunda fonte de dados utilizada para a criação das HRUs foi o mapa de solos do local. Este foi obtido através do CCJ (2017). A partir deste mapa foi isolada a área desejada, Figura 10, com descrição dos solos, Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição dos Solos da Área de Estudo

SOIL_ID	Símbolo	Descrição
10000	AU	Áreas Urbanizadas
10001	PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo
10002	PAd	Argissolo Amarelo
10003	CYb	Cambissolo Flúvico
10004	CXb	Cambissolo Háplico
10005	CHb	Cambissolo Húmico
10006	RLd	Neossolo Litólico

Fonte: O Autor.

Figura 10 – Mapa de Solos da Área de Estudo



Fonte: Adaptado de CCJ (2017).

Com a área de estudo isolada, foram atribuídos valores numéricos crescentes, a partir de 10000, para identificação. Optou-se por utilizar a numeração a partir do número 10000 pois o SWAT+ possui um banco de dados com centenas de solos cadastrados. Assim, iniciando em 10000, não há problemas de interferência com valores já existentes. A relação dos valores numéricos utilizados com os diferentes solos pode ser vista na Tabela 1.

Essa identificação numérica foi necessária para a transformar o mapa de formato vetorial para matricial. Essa transformação foi feita pois o SWAT+ exige que este mapa seja um arquivo *raster* (matricial). Após este processo obteve-se um mapa, *raster*, com tamanho de pixel de 2,7 m.

Paralelamente às informações de tipo de solo para cada localidade, também foi necessário obter diversos parâmetros de cada tipo de solo (Quadro 2). Estes foram obtidos através do boletim técnico gerado pelo levantamento de Potter *et al.* (2004) e Uberti (2011).

A região classificada por “Área Urbanizada”, apresentada na Figura 11, não possui classificação em nenhuma das fontes mencionadas, porém se encontra envolta pela classificação “Cambissolo Flúvico”. Desse modo, optou-se por considerar a região “Área Urbanizada” como sendo de Cambissolo Flúvico.

Após considerar a etapa de delineamento mencionada no item anterior, têm-se que a distribuição do solo considerada segue os valores da Tabela 2.

Quadro 2 – Parâmetros do Solo

Parâmetros do tipo de solo	Variável
Nome do Solo	SNAM
Número de camadas	NLAYERS
Profundidade máxima de raízes	SOL_ZMX
Grupo hidrológico do solo	HYDGRP
Erodibilidade superficial	USLE_K(1)
Parâmetros de cada Camada	
Profundidade	SOL_Z(i)
Densidade do solo	SOL_BD(i)
Condutividade hidráulica	SOL_K(i)
Porcentual de argila	CLAY(i)
Porcentual de silte	SILT(i)
Porcentual de areia	SAND(i)
Porcentual de rocha	ROCK(i)
Albedo (camada superficial)	SOL_ALB1
Quantidade de água disponível	SOL_AWC(i)
Erodibilidade	USLE_K(i)
Porcentual de carbono orgânico	SOL_CBN(i)

Fonte: Adaptado de Neitsch *et al.* (2011).

Tabela 2 – Distribuição do Solo

Solo	Área (km ²)	Bacia (%)
PAd	113.48	30.90
CXb	163.10	44.40
CHb	9.81	2.67
RLd	56.80	15.47
CYb	19.06	5.19
PVa	5.05	1.37

Fonte: Adaptado de CCJ (2017).

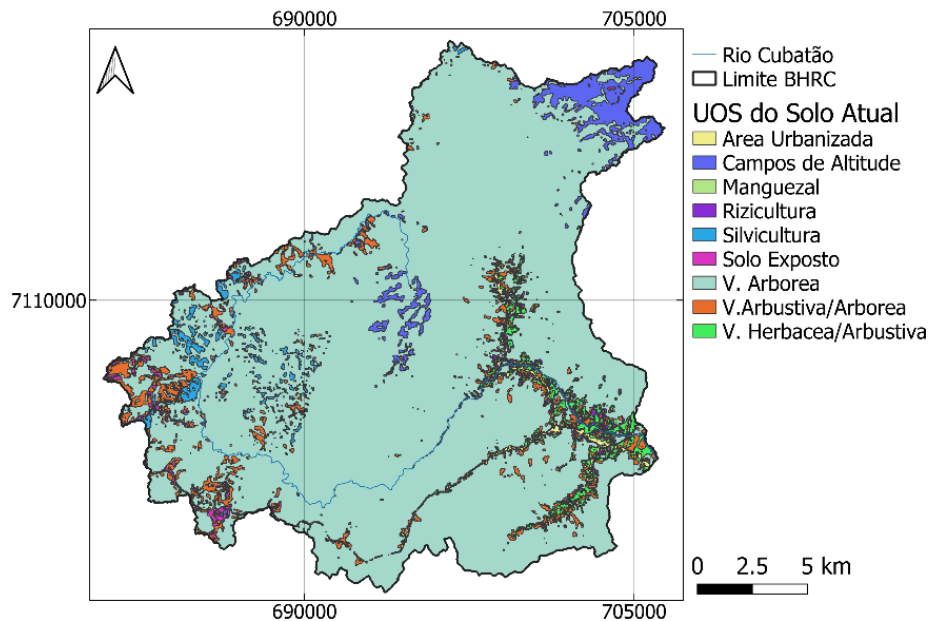
3.3.1.3 Mapa de Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do solo, em formato *shapefile*, foi obtido da Universidade da Região de Joinville – Univille, em parceria ao Ministério Público Federal – MPF (2016), Figura 11. Como pode ser observado, o mapa foi dividido em nove temas distintos, cada um representando uma definição de uso do solo. Os temas utilizados foram: Área Urbanizada; Campos de Altitude; Manguezal; Rizicultura; Silvicultura; Solo Exposto; Vegetação Arbórea; Arbustiva/Arbórea; Herbácea/Arbustiva.

Para cada um dos temas mencionados, devem ser fornecidos parâmetros ao SWAT+, processo similar ao mapa pedológico. Entretanto, os parâmetros não são os

mesmos para temas de naturezas distintas. Enquanto para produção agrícola é necessário descrever aspectos como o tipo e manejo de plantação, a ocupação urbana necessita de porcentual de impermeabilização, e assim por diante.

Figura 11 – Uso e Ocupação do Solo da Área de Estudo



Fonte: Adaptado de Univille/MPF (2016).

Não houve necessidade, no caso do mapa de uso e ocupação, de buscar na literatura os parâmetros utilizados, pois o próprio banco de dados do SWAT+ oferece esses valores. Foi preciso, porém, criar um indicador dos usos e coberturas do solo presentes na região (temas citados anteriormente), para relacionar os temas utilizados aos temas do banco de dados do *software*.

O Quadro 3 apresenta o indicador mencionado, a descrição e classificação de cada uso do solo. Os códigos utilizados foram os mesmos do banco de dados do SWAT+, permitindo o acesso direto do programa às características de cada de cada uso.

A definição, e consequente descrição de cada classe foi realizada por SEPUD (2020), que forneceu o tipo de vegetação predominante em cada classe. Com esta descrição, foram selecionados os usos de características mais próximas às reais do banco de dados do SWAT+.

De modo similar ao mapa de solos, após o delineamento têm-se que a distribuição dos usos e ocupação da região, na área utilizada neste trabalho, está apresentada pela Tabela 3.

Quadro 3 – Relação Código e Uso e Ocupação do Solo

LANDUSE_ID	SWAT_CODE	Descrição	Classificação
1	urld	Residencial de Baixa Densidade	Área Urbanizada
2	barr	Solo Exposto	Solo Exposto
3	agrl	Agricultura Genérica	Campos de Altitude
4	wetn	Vegetação Herbácea Emergente em Zonas Úmidas sem Florestas	Manguezal
5	rice160	Arroz com 160 Dias de Maturação	Rizicultura
6	pine	Vegetação Predominantemente de Pinus	Silvicultura
7	frse_suhf	Floresta Tropical Sempre-Verde Úmida	Vegetação Arbórea
8	rngb_suhf	Floresta Tropical Sempre-Verde Úmida Com Arbustos	Vegetação Arbustiva/Arbórea
9	wenb	Vegetação Herbácea de Zonas Úmidas	Vegetação Herbácea/Arbustiva

Fonte: O Autor.

Tabela 3 – Distribuição do Uso e Ocupação do Solo

Uso e Ocupação do Solo	Área (km²)	Bacia (%)
pine	4.92	1.34
frse_suhf	317.67	86.49
rngb_suhf	16.85	4.59
agrl	12.63	3.44
barr	2.79	0.76
wehb	6.97	1.90
urld	3.14	0.85
rice160	2.32	0.63
wetn	0.01	0.00

Fonte: Adaptado de Univille/MPF (2016).

3.3.1.4 HRUs

A geração de HRUs para as sub-bacias pode ser feita de dois modos distintos: HRU única ou múltipla. Ao optar pela HRU única, cada sub-bacia do modelo terá apenas uma HRU, definida com base na classe dominante de uso do solo presente no local. Caso a opção de múltiplas HRUs seja selecionada, deve-se definir um nível de sensibilidade de uso, de tipo de solo e declividade. Neste caso, o número de HRUs a serem utilizadas é dependente do valor de sensibilidade adotado, quanto maior a

sensibilidade mais HRUs serão utilizadas. No presente trabalho optou-se por utilizar a segunda opção, múltiplas HRUs pois esta apresenta maior fidelidade à realidade, entretanto necessita de maior tempo de processamento (DILE; SRINIVASAN; GEORGE, 2015).

No processo de geração de HRUs, é oferecido ao usuário a opção de delimitar as HRUs a serem geradas de acordo com faixas de declividade do terreno. Neste trabalho optou-se por consideradas faixas de declividade de: 0-5%, 5-10%, 10-20% e >20%.

Após a seleção de uso de diferentes níveis de declividade, o SWAT+ faz a leitura de todas as informações geográficas inseridas no programa. A partir destas informações é apresentada a quantidade de possíveis HRUs, além de diversos dados da região, como porcentual de usos e tipos do solo e área de cada HRU em potencial. Com base nestas informações cabe ao usuário determinar um nível de sensibilidade para geração das HRUs finais. O objetivo desta etapa é reduzir o número de HRUs, pois ao remover áreas pouco influentes na modelagem se acelera o procedimento de cálculo. Optou-se por utilizar a sensibilidade de 2% para o uso e ocupação, devido ao tamanho reduzido das áreas deste parâmetro. Para o tipo de solo foi utilizada a sensibilidade de 4% e para a declividade optou-se por utilizar a sensibilidade de 4%. Isso significa que os parâmetros cujas áreas sejam menores que o nível de sensibilidade, quando comparadas à área da sub-bacia em que estão inseridas, não serão consideradas na geração das HRUs. As informações destas regiões são incluídas, proporcionalmente, às HRUs adjacentes (DILE, SRINIVASAN, GEORGE, 2015).

3.3.2 Dados Climáticos

O SWAT+ utiliza uma grande quantidade de informações climáticas para desenvolver um modelo hidrológico. É essencial que sejam fornecidos os valores da precipitação e temperaturas máximas e mínimas diárias ao *software*. Entretanto, para maior fidelidade é recomendado que sejam fornecidos outros parâmetros diários, como: velocidade do vento; radiação; umidade relativa do ar. A partir destas informações o usuário do SWAT+ pode calcular e inserir no programa os outros parâmetros apresentados no Quadro 1. Caso o usuário não forneça estes outros parâmetros, o gerador climático do SWAT irá calculá-los, quando possível,

considerando apenas os 10 primeiros anos das séries temporais utilizadas (SILVA, 2015; LINO, 2009; NEITSCH *et al.*, 2011).

Para adicionar estas informações no *software*, é necessário informar ao mesmo, ainda, a localização (coordenadas geográficas e cota) da estação utilizada na medição. Esta localização é fundamental, pois o SWAT+ utiliza a estação mais próxima ao centroide de cada sub-bacia para o cálculo das variáveis climáticas (DILE; SRINIVASAN; GEORGE, 2015). É recomendável uma série histórica de dados com no mínimo 10 anos de leituras diárias para cada variável (BRESSIANI *et al.*, 2015).

No presente estudo não foi possível abastecer o *software* com todas as informações mencionadas, foram fornecidos apenas os dados diários de precipitação e temperaturas máxima e mínima. Apesar de estarem disponíveis todas as informações para a série histórica utilizada, optou-se por fazer uso exclusivamente da precipitação e temperaturas pois os valores de previsão climática futura dispõem apenas destas variáveis.

Foram utilizadas, no entanto, informações sobre a radiação solar local para o cálculo da estimativa de evapotranspiração potencial local, pelo método de Hargreaves em planilha excel, para a série histórica e períodos futuros. Optou-se por realizar este cálculo manualmente para comparação com os resultados gerados pelo SWAT+.

Para a inserção de dados no SWAT foi utilizada a estação hidrometeorológica de Pirabeiraba (cód. 2648033), Tabela 4, como a única estação, utilizando uma série temporal de 23 anos, entre 01/01/1996 e 31/12/2018. Entretanto, esta estação apresenta lacunas em sua série de precipitação e não apresenta medições de temperatura, informações indispensáveis na elaboração do modelo. Desse modo, foram utilizadas outras estações da região, também descritas na Tabela 4, para sanar esta falta de informações.

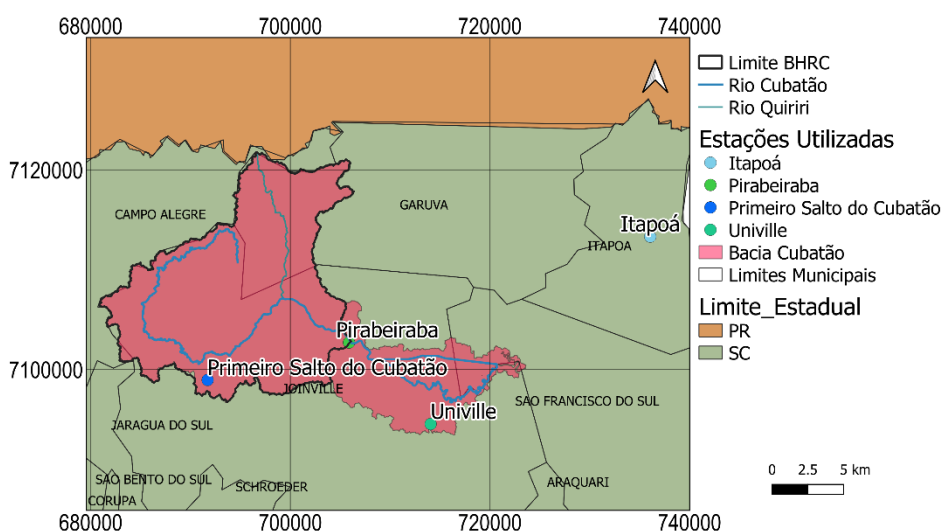
Tabela 4 – Estações Climáticas

Nome	Variável Utilizada	Latitude	Longitude	Elevação	Cód.	Org. Responsável
Pirabeiraba	Precipitação	7102700	705878	43	2648033	ANA
Primeiro Salto do Cubatão	Precipitação	7098946	691713	790	2649060	EPAGRI-SC
Univille	Temperatura	7094534	714061	11	2648036	ANA
Itapoá	Temperatura	7113318	736064	6	A851	CEMADEN

Fonte: Adaptado de ANA (2021).

O tratamento das falhas de precipitação da estação de Pirabeiraba se deu por meio de regressão linear simples (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2009) com a estação Primeiro Salto do Cubatão, visto que ambas estão inseridas na mesma bacia hidrográfica (cerca de 14,5 km de distância) e possuem leituras para todo o período. Já para as informações de temperatura foram utilizados os dados da estação Univille, localizada a cerca de 11,5 km da estação de Pirabeiraba, com período de leituras de 1996 a 2011. Para os anos de 2012 e 2013, além de correções das lacunas de leituras da estação da Univille, foi feito o preenchimento através de uma regressão linear simples com a estação de Itapoá, entorno de 31,8 km de distância. A localização das estações utilizadas está representada na Figura 12.

Figura 12 – Localização das Estações Meteorológicas Utilizadas



Fonte: Adaptado de CCJ (2018a e 2018b) e ANA (2021).

Com base nas informações inseridas, o gerador climático do SWAT+ foi responsável em preencher os dados adicionais das variáveis ligadas à precipitação e temperatura apresentadas no item 2.4.2.1.1, salvo os valores de precipitação máxima de meia hora, que devem ser ajustados de acordo com coeficientes regionais. Para esta variável foi realizada a desagregação de valores diários de precipitação para valores de 24 horas, posteriormente para 1 hora e finalmente para 30 minutos através da multiplicação pelos coeficientes da Tabela 5.

Outro papel do gerador climático foi o fechamento de lacunas das séries históricas que persistiram após as regressões realizadas.

Tabela 5 – Coeficientes de Conversão de Precipitação

Conversão	Coeficiente
Diária -> 24 h	1,14
24 h -> 1 h	0,492
1 h -> 30 min	0,748

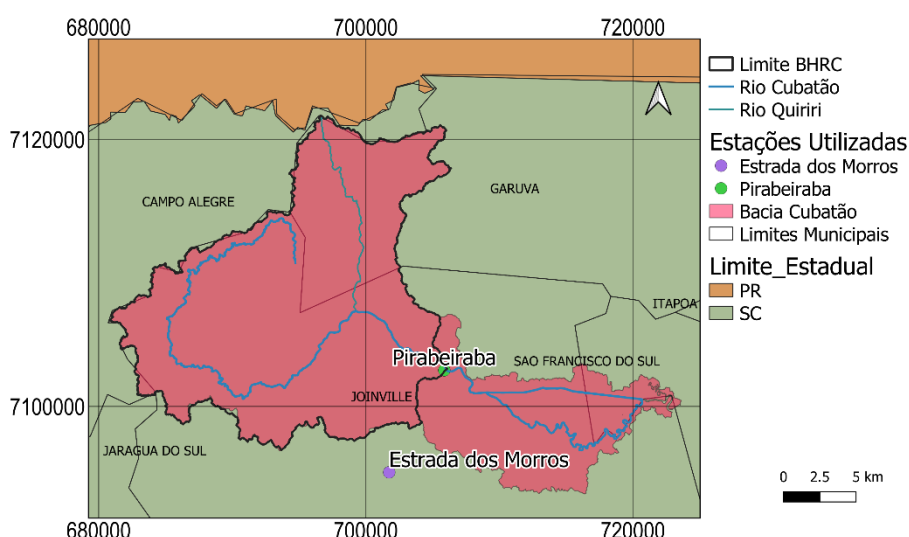
Fonte: Back, Oliveira e Henn (2012) e Issa (2017).

3.3.3 Vazão Observada

Para efetuar a calibração e a validação do modelo foi essencial obter os valores de leituras de vazão para o período de estudo. Para tal, foram utilizadas as informações de vazões médias mensais do Rio Cubatão obtidas através da ANA (2021) para a estação de Pirabeiraba, nº 82270050, devido à sua localização próxima ao ponto de exultório atribuído ao modelo gerado.

Assim como nos dados climáticos, houve necessidade de preencher lacunas da série histórica da estação. Esta etapa foi realizada através de uma regressão linear simples com a estação Estrada do Morro (cód. 82769800), a 8,7 km de distância. A Figura 13 traz uma representação da localização das estações fluviométricas utilizadas.

Figura 13 – Localização das Estações Fluviométricas Utilizadas



Fonte: Adaptado de CCJ (2018a e 2018b) e ANA (2021).

O período histórico de dados utilizado foi determinado com base em dois fatores: período disponível de dados climáticos e eventos históricos de alteração de leituras de vazão. Com base no histórico de dados climáticos, foi estabelecida a data

limite superior de 31/12/2018, dados mais recentes foram considerados duvidosos após comparação das leituras de vazões e precipitações para a região. A data limite inferior para o modelo foi determinada com base no segundo fator mencionado, ou seja, em eventos históricos, mais especificamente na inundação que ocorreu no município em fevereiro de 1995 (SILVEIRA, 2008), com impacto direto no comportamento do Rio Cubatão.

Um ponto a ser ressaltado é que as leituras de vazão do Rio Cubatão estão ligadas à captação de água do abastecimento urbano. Em épocas de estiagem, é prática comum da companhia de saneamento executar alterações no enrocamento a jusante do ponto de captação visando elevar o nível d'água. Essa prática, entretanto, tem efeito direto nas leituras de vazões realizadas. Ao modificar o enrocamento, o nível de água aumenta e, mesmo com a vazão sendo a mesma, a equação da curva chave do rio passa a fornecer uma vazão superestimada. Como a companhia de saneamento não possui registros dessas operações no Rio Cubatão, não é possível determinar quais períodos estão superestimados, reduzindo a qualidade dos dados observados.

3.4 CALIBRAÇÃO E CONFIRMAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo SWAT é feita, de acordo com Arnold *et al.* (2012), em quatro etapas, são elas: Definição de Parâmetros de Avaliação, Análise de Sensibilidade; Calibração; Confirmação. Todas estão descritas a seguir.

3.4.1 Definição dos Parâmetros de Avaliação

Para iniciar o processo de análise de sensibilidade, calibração e validação foi preciso definir, inicialmente, os parâmetros a serem utilizados. Optou-se por avaliar os parâmetros com maior influência no escoamento superficial segundo Abbaspour *et al.* (2015), além dos parâmetros mencionados por Moreira, Schwambach e Rigo (2018) comumente tidos como os mais influentes na modelagem SWAT. Desse modo, os parâmetros selecionados estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros Seleccionados para Avaliação

Parâmetro	Descrição
CN2	Número de Curva
esco	Fator de compensação de evaporação do solo
epco	Fator de compensação de absorção pela vegetação
canmx	Capacidade máxima de armazenamento das copas
revap_co	Coeficiente de movimentação da água subterrânea
revap_min	Limite mínimo de "revap" para ocorrer percolação para o aquífero profundo
flow_min	Valor mínimo armazenado no aquífero para ocorrer vazão reversa
z	Profundidade das camadas de solo
awc	Capacidade de armazenamento de água nas camadas de solo
k	Condutividade hidráulica saturada

Fonte: O Autor.

3.4.2 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é a segunda etapa na calibração e validação da modelagem SWAT, nela é avaliada a taxa com que diferentes parâmetros influenciam a resposta do modelo. Os parâmetros identificados como mais sensíveis são geralmente utilizados na calibração deste. Em outras palavras, a sensibilidade é medida como a resposta de uma variável de saída à mudança de um parâmetro de entrada. Quanto maior a mudança na resposta de saída, maior a sensibilidade (WHITE; CHAUBEY, 2005). A vantagem da análise de sensibilidade está em reduzir o número de parâmetros utilizados na calibração, tornando o processo mais rápido (ARNOLD *et al.*, 2012).

Segundo Arnold *et al.* (2012) geralmente são executados dois tipos de análise de sensibilidade, um local e um global. Na análise local o valor de cada parâmetro é alterado individualmente e é observada a variação da saída. Já na análise global, todos os parâmetros podem sofrer alterações. De modo geral a sensibilidade de um parâmetro é dependente do valor de outro(s), por este motivo a análise global pode oferecer informações mais detalhadas. Em contrapartida esta análise é mais lenta, devido ao grande número de simulações.

Visto que o SWAT é sensível a uma imensa quantidade de variáveis de entrada relacionadas à vegetação, manejo e tipo dos solos, clima, aquíferos, canais e reservatórios não é viável a determinação exata de cada uma (JHA, 2006). Motivo que justifica a execução da análise de sensibilidade. No presente trabalho a análise de

sensibilidade foi elaborada no software SWAT+ Toolbox, através da análise de sensibilidade global pelo método de Sobol. Foram utilizadas 80 amostras para cada parâmetro em análise, com um total de 1760 iterações. Optou-se por considerar relevantes aqueles parâmetros com sensibilidade superior a 0,05, ou seja, relevância de 5%.

3.4.3 Calibração

Após a realização da análise de sensibilidade, têm-se quais os parâmetros de entrada com maior influência na saída. Assim, é possível iniciar a etapa de calibração da simulação pelo método *Dynamically Dimensioned Search* (DDS), de Tolson e Shoemaker (2007). Segundo Silva (2015) e Kuwajima (2012) esta etapa tem como intuito alterar o valor de cada parâmetro de entrada considerado sensível.

É de entendimento de Silva (2015) que a série total de dados deve ser dividida em duas, a primeira parcela para realização da calibração e a segunda para a confirmação, ou validação. Na primeira etapa os valores dos parâmetros de entrada são atualizados por diversas iterações, até o momento em que a resposta do modelo seja similar às medições de vazões reais (KUWAJIMA, 2012).

O período de calibração utilizado no modelo foi de 16 anos, iniciando em 01 de janeiro de 2003 e finalizando em 31 de dezembro de 2018. Para um melhor resultado, optou-se por considerar os dois primeiros anos, de 2003 e 2004, como anos de aquecimento, ou seja, um período para o preenchimento de informações no modelo sem gerar resultados.

3.4.4 Confirmação/Validação

Para a etapa de confirmação, ou validação, o processo é similar à etapa de calibração. São fornecidos dados de entrada ao modelo e comparada sua resposta aos dados de medições reais. Entretanto, para esta etapa deve ser utilizada a segunda parcela da série de dados e os valores de cada parâmetro são fixos, tendo sido determinados pela iteração da calibração de melhor resultado (KUWAJIMA, 2012).

Nesta etapa foram considerados os valores climáticos e de vazões de 01 de janeiro de 1996 a 31 de dezembro de 2002, totalizando 7 anos para validação do modelo, dos quais os 2 primeiros foram de aquecimento.

Para definir os períodos de calibração e confirmação fez-se uma comparação entre as médias e desvios padrão das vazões observadas (Tabela 6). O ano final da calibração e início da validação foi determinado de modo que ambos, média e desvio padrão, sejam relativamente próximos entre as duas etapas, indicando períodos de comportamento similares (ABBASPOUR, 2020).

Tabela 6 – Comportamento Calibração x Validação

Vazões Médias Mensais		
Etapa	Média (m³/s)	Desv. Pad.
Calibração (2003-2018)	20.21	11.49
Validação (1996-2002)	18.46	10.82

Fonte: O Autor.

3.4.5 Desempenho do Modelo

Após a etapa de validação foram avaliadas as estatísticas de precisão apresentadas no item 2.5.3, o NSE , R^2 e P_{bias} . Apesar da literatura, como em Moriasi *et al.* (2007), considerar satisfatórios valores de $NSE > 0,5$, $R^2 > 0,5$ e $-25\% < P_{bias} < 25\%$, neste trabalho foi considerado adendo feito por Abbaspour (2022) e Arnhold *et al.* (2012) que traz a análise de que a estatística de precisão satisfatória ser intrinsicamente ligada à qualidade dos dados de entrada. Assim, o valor de $NSE > 0,3$ foi tido como aceitável, visto que a necessidade de correção da série histórica de precipitação e temperatura, além do efeito das alterações no enrocamento para captação da água para abastecimento público, ambos prejudicaram a qualidade dos dados de entrada.

3.5 SIMULAÇÕES

As mudanças climáticas têm grande influência em ações de escala global, visto que está baseada em estudos de escala mundial, sendo pouco afetada pelo que ocorre dentro de uma bacia individual (IPCC, 2019a). Ao contrário do uso e ocupação do solo (UOS), que é uma ação direta dentro da bacia por via de políticas públicas.

Com base no apresentado, foram elaboradas simulações de três cenários: Avaliação exclusiva do efeito de mudanças no uso e ocupação do solo (C-1); Avaliação exclusiva do efeito das mudanças climáticas (C-2); Avaliação do efeito

combinado de alteração do UOS e mudanças climáticas (C-3). Em todos os cenários foram considerados os valores médios mensais para as análises.

Ademais, em cada cenário analisaram-se valores do ano hidrológico completo (set.-ago.), apenas os valores referentes a época úmida (set.-mar.) e, ainda, considerando apenas os valores referentes a época seca (abr.-ago.). A significância, ou não, dos resultados da avaliação de cada caso foi determinado através do teste t de Student pareado com relevância de 95% (MONTGOMERY, 2013). Cada cenário mencionado é apresentado com mais detalhes a seguir.

3.5.1 Cenário 1: Mudança do Uso e Ocupação

3.5.1.1 Descrição do Uso e Ocupação do Solo Atual e Futuro

A parcela da área de estudo pertencente a Joinville, está localizada na zona rural da cidade. De acordo com a Lei Complementar nº 470, de 09 de janeiro de 2017 (JOINVILLE, 2017), a área está, ainda, subdividida em ARPA e ARUC. Uma representação destas áreas foi gerada pela Prefeitura Municipal de Joinville – PMJ (2017), adaptada pela Figura 14. A parcela pertencente à Garuva, também tem a classificação ARPA, segundo a Lei Complementar nº 112, de 27 de dezembro de 2018, e está inclusa na figura mencionada (GARUVA, 2018).

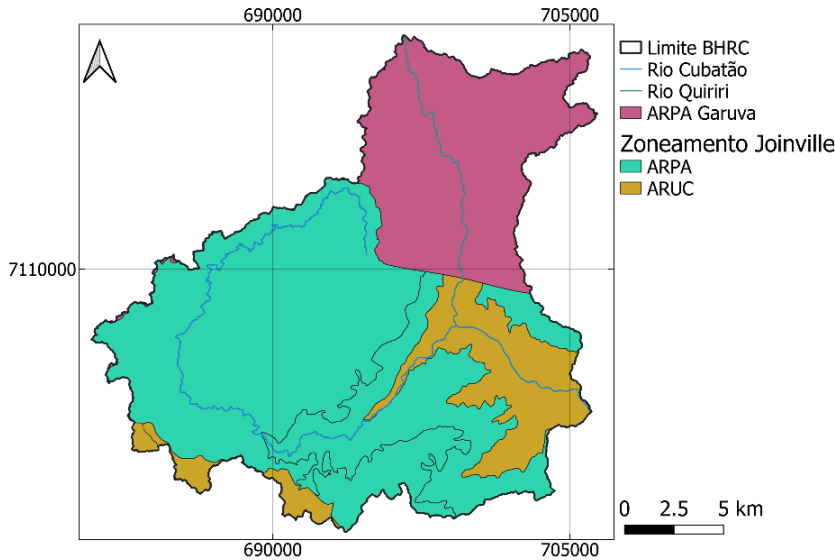
A definição ARPA indica, de acordo com a Lei Complementar nº 470, de 09 de janeiro de 2017 (JOINVILLE, 2017), as áreas nas quais o objetivo é a preservação. Especificamente para a área de estudo é apresentado, ainda, o objetivo de manutenção do manancial, tanto para a parcela referente à Joinville quanto à Garuva. Já as ARUCs, são extensões que permitem a produção agropecuária e extração mineral, sendo uma espécie de transição entre a ocupação urbana e a ARPA. Indicam, ainda, o a tendência de ocupação do município.

Para este trabalho, as áreas ARPAs foram consideradas fixas, com os usos e ocupações presentes. Entretanto, para as áreas ARUCs, foi considerado ocupação total prevista na Lei Complementar nº 470, de 09 de janeiro de 2017 (JOINVILLE, 2017). Assim, para os cenários que fazem uso da mudança do uso e ocupação do solo, todas as áreas ARUC foram convertidas em produção agrícola.

Apesar da classificação ARPA e ARUC, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (2015), há intenção em extração mineral na região, como

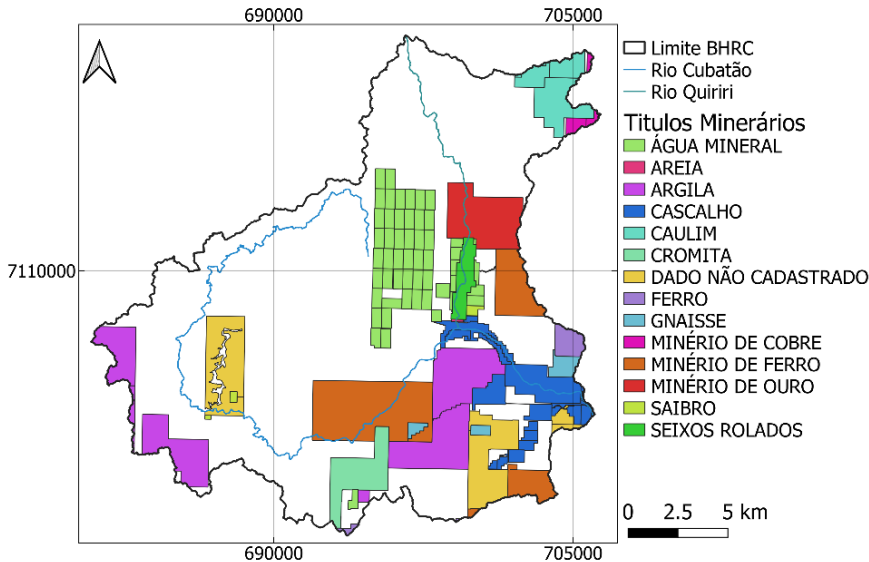
pode ser visto nas Figuras 15 e 16. Esta atividade foi considerada na simulação para as áreas em fase de Licenciamento e Concessão de Lavra, de acordo com a Figura 16, independente da classificação ARPA/ARUC.

Figura 14 – Zoneamento da Área de Estudo



Fonte: Adaptado de PMJ (2017), Garuva (2018) e CCJ (2018).

Figura 15 – Títulos Minerários – Material

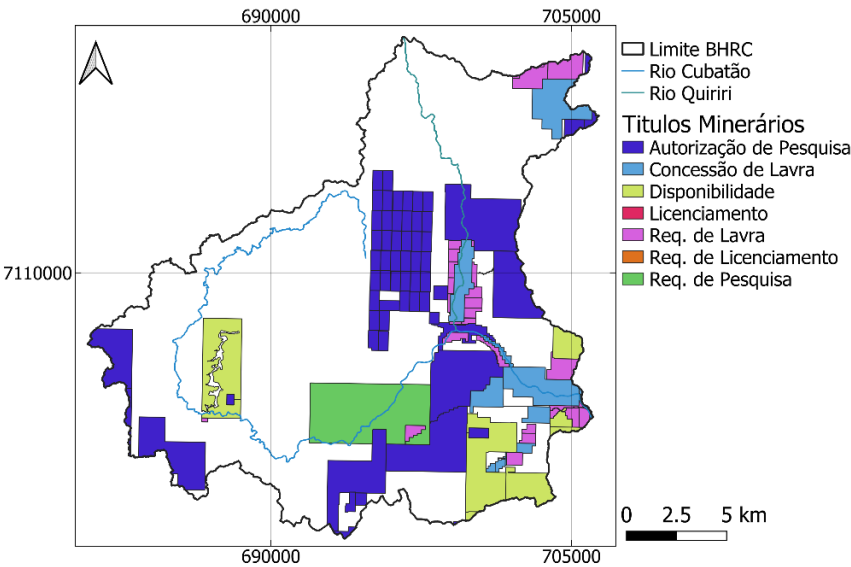


Fonte: Adaptado de DNPM (2015) e CCJ (2018).

Os usos que se enquadraram nas duas fases mencionadas foram apenas extração de cascalho e seixo rolado. Não foi possível quantificar o impacto da produção de seixo rolado no perfil dos rios e córregos, deste modo essa alteração de

uso e ocupação não foi implementada no modelo. Já as áreas de extração de cascalho foram tomadas como áreas de solo exposto, classificação “barr” da Figura 11.

Figura 16 – Títulos Minerários – Fase



Fonte: Adaptado de DNPM (2015) e CCJ (2018b).

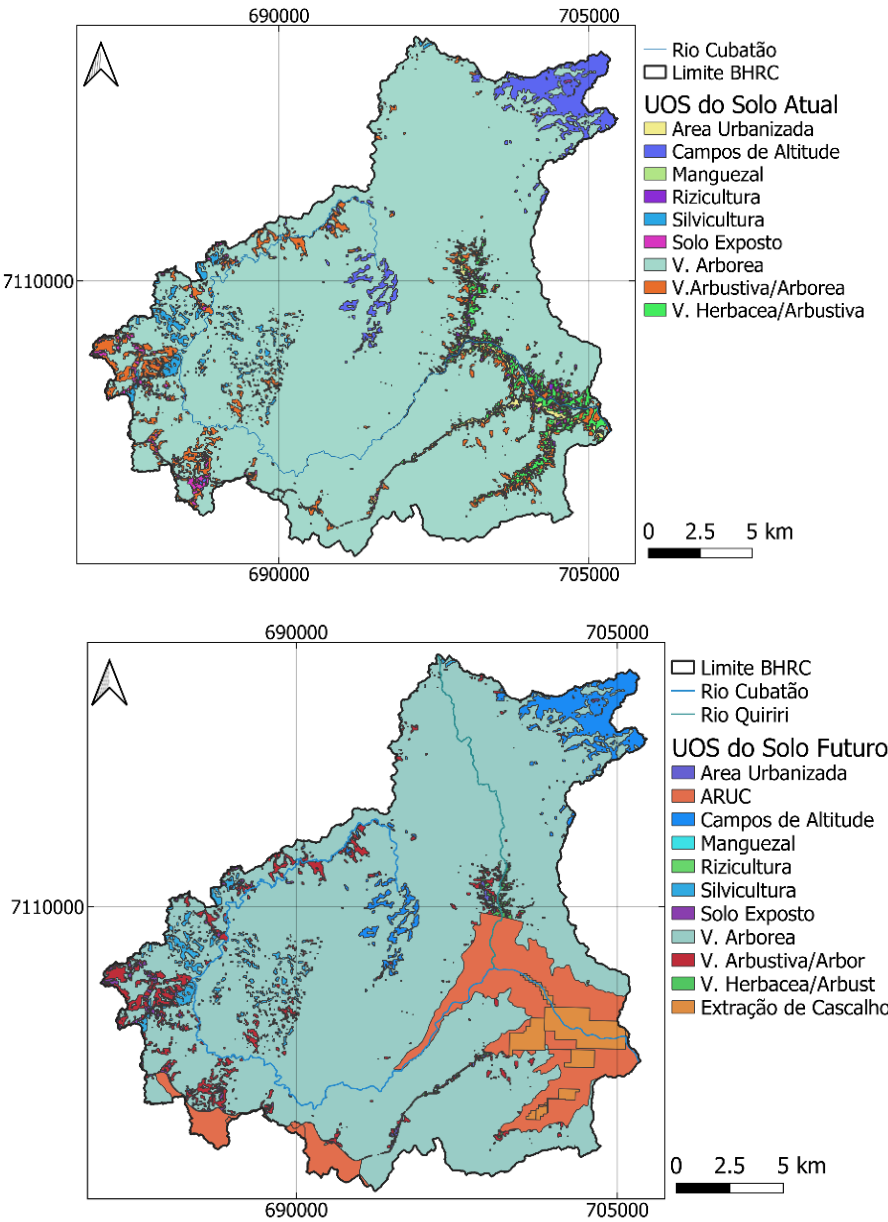
Após a implantação das alterações do uso e ocupação previstos tem-se o mapa da Figura 17. E, ao considerar o delineamento da região, têm-se a Tabela 7, com a distribuição dos usos e ocupação e a variação de seus valores originais.

Tabela 7 – Distribuição Uso e Ocupação do Solo

Código SWAT	Uso e Ocupação do Solo	Uso do Solo Atual		Uso do Solo Futuro		Variação	
		Área (km²)	Bacia (%)	Área (km²)	Bacia (%)	Área (km²)	Bacia (%)
pine	Silvicultura	4.92	1.34	4.92	1.34	0	0
frse_suhf	Vegetação Arbórea	317.67	86.49	285.41	77.71	-32.26	-8.78
rngb_suhf	Vegetação Arbustiva / Arbórea	16.85	4.59	10.9	2.97	-5.95	-1.62
agrl	Campos de Altitude / ARUC	12.63	3.44	52.09	14.18	39.46	10.74
barr	Solo Exposto / Extração de Cascalho	2.79	0.76	11.63	3.17	8.84	2.41
wenb	Vegetação Herbácea / Arbustiva	6.97	1.9	0.96	0.26	-6.01	-1.64
urld	Área Urbanizada	3.14	0.85	1.11	0.3	-2.03	-0.55
rice160	Rizicultura	2.32	0.63	0.28	0.08	-2.04	-0.55
wetn	Manguezal	0.01	0	0	0	-0.01	0

Fonte: O Autor.

Figura 17 – Alteração de Uso e Ocupação do Solo



Fonte: O Autor.

3.5.1.2 Análises Efetuadas Para C-1

Para o cenário C-1 foram utilizadas as informações climáticas da série de dados históricos (S.H.) referentes ao período de 1998-2018, as informações de uso e ocupação do solo atual (S.A.) e as informações de uso e ocupação do solo previstas para o futuro (S.F.).

Neste primeiro cenário foram comparadas as variáveis evapotranspiração (ET) e vazão. No caso da vazão, a comparação se deu entre os valores da S.H., os valores estimados pelo SWAT+, ao utilizar as informações de S.A., e os valores estimados

pelo SWAT+ utilizando as informações de S.F. No que diz respeito à ET, entretanto, não há registros históricos de medição. Assim, apenas a comparação da ET estimada pelo SWAT+, entre os dois UOS, foi realizada.

Este cenário procurou expor se há, ou não, diferença significativa entre os valores médios mensais de ET (estimada) e vazão históricos, aqueles estimados com base no S.A., e aqueles estimados com base no S.F.

3.5.2 Cenário 2: Alterações Climáticas

3.5.2.1 Descrição das Mudanças Climática

Para a simulação de mudanças climáticas, optou-se por buscar modelos de previsão baseados no Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado, Fase 5 – CMIP5, gerido pelo Programa Mundial de Pesquisa do Clima – WCRP, utilizado na elaboração do relatório especial do IPCC (2019a) que possui intuito de fortalecer as ações internacionais de combate ao aquecimento global. Sua meta é impedir que a temperatura média global chegue a 2°C acima da temperatura pré-industrialização (IPCC, 2019a).

No CMIP5 são considerados diversos cenários, chamados de RCPs, ou *Representative Concentration Pathways*. Cada um destes indica o quanto foi possível controlar a concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera até 2099. Os RCPs mais comuns são RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, representando, respectivamente, de maior a menor controle dos gases do efeito estufa (SILVEIRA *et al.*, 2013). Maiores informações sobre os cenários de previsão climática podem ser obtidas em Moss *et al.* (2010).

No presente estudo foram utilizados cinco Modelos Globais Climáticos (GCM) adquiridos da *Water Weather Energy Ecosystem – 2w2e* (2021): GFDL-ESM2M; HadGEM2-ES; IPSL-CM5A-LR; MIROC-ESM-CHEM; NorESM1-M. Doravante denominados, respectivamente, GCM 1 à 5, respectivamente. Cada um destes GCMs foi gerado para o CMIP5, simulando os quatro RCPs mencionados anteriormente. Todos os GCMs adquiridos passaram por um processo de alteração e padronização de escala e correção de vieses (ABBASPOUR *et al.*, 2019). Maiores informações

sobre o CMIP5 podem ser encontradas em Taylor, Stouffer e Meehl (2012) e, sobre as modificações nos GCMs, em Abbaspour *et al.* (2019).

A nomenclatura de cada GCM indica, em ordem, a instituição que o gerou e o tipo do modelo, podendo, ainda, possuir um indicativo de subdivisão se necessário. Cada GCM utiliza métodos e modelos distintos, que não serão detalhados no presente trabalho, as informações sobre a nomenclatura, assim como a localização de detalhes sobre cada modelo estão apresentados a seguir:

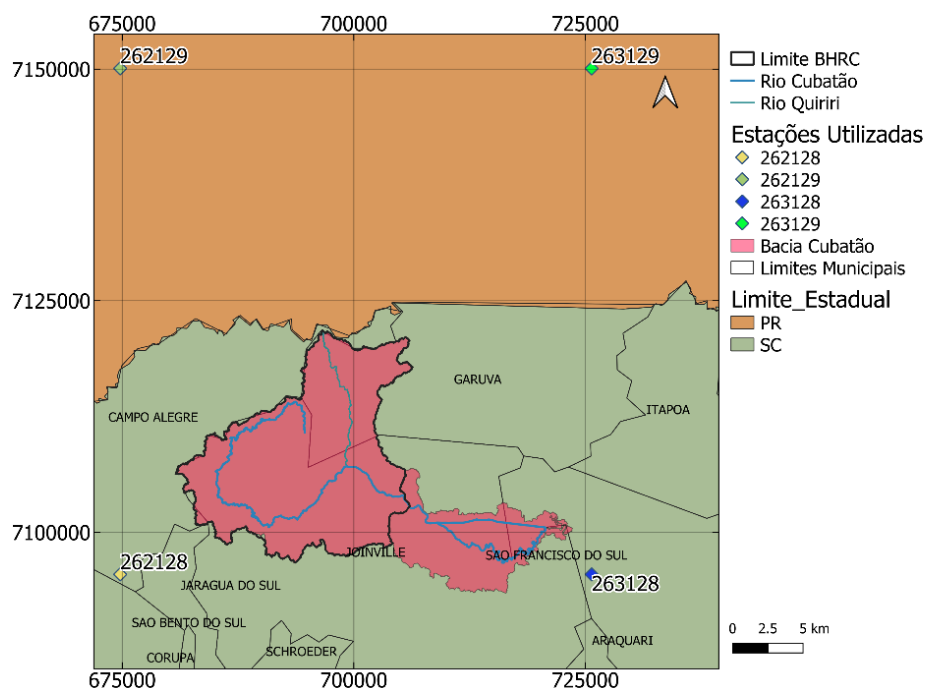
- a) GFDL-ESM2M – Modelo elaborado pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (NOAA) e o Laboratório Geofísico de Dinâmica de Fluidos (GFDL), do tipo Modelo de Sistema Terrestre (ESM). A letra “M” no final da nomenclatura indica a utilização do Modelo de Oceano Modular v. 4.1 para as análises físicas dos oceanos. Mais detalhes estão disponíveis em Dunne *et al.* (2012);
- b) HadGEM2-ES – Modelo desenvolvido pelo *Met Office Hadley Centre* e classificado com ESM. O final “ES” aponta a utilização de componentes externos ao modelo, denominados componentes do Sistema Terrestre pelos autores. A metodologia aplicada na criação do HadGEM2-ES juntamente com a lista dos componentes utilizados está descrita em Collins *et al.* (2011);
- c) IPSL-CM5A-LR – Gerado pelo Instituto Pierre-Simon Laplace (IPSL), também chamado de Modelo de Circulação versão 5 (CM5), pode ser considerado um modelo ESM, a depender das configurações, dos processos e suas interações. A sigla A-LR informa o método utilizado na análise oceânica e a “baixa” resolução do modelo. Para maiores detalhes consultar Dufresne *et al.* (2013);
- d) MIROC-ESM-CHEM – Modelo ESM baseado no modelo climático global MIROC (Modelo para Pesquisa Interdisciplinar sobre Clima). O MIROC-ESM-CHEM foi desenvolvido em parceria entre a Universidade de Tóquio, o Instituto Nacional de Estudos Ambientais do Japão (NIES) e a Agência Japonesa para Ciência e Tecnologia Marinho-Terrestre (Jamstec). O final “CHEM” da nomenclatura infere à inserção da análise química atmosférica no modelo. Watanabe *et al.* (2011) explanam o processo e detalhes sobre a elaboração do MIROC-ESM-CHEM.

- e) NorESM1-M – Criada pelo Centro Climático Norueguês, a família NorESM são modelos ESM, onde o NorESM1 representa a primeira versão. O término “M” aponta qual o modelo oceânico utilizado, além de características da análise atmosférica considerados. Informações sobre o NorESM1-M podem ser obtidos em Betsen *et al.* (2012) e Iversen *et al.* (2013).

Antes de inserir as informações necessárias de cada GCM no SWAT, procurou-se avaliar o comportamento da precipitação de cada um comparando com o comportamento da precipitação da série histórica. Para tal, informações da precipitação de 2008-2018 foram utilizadas (período de sobreposição entre os GCM e a série histórica) e foi executada uma comparação pelo método de correlação de Pearson. Optou-se por utilizar apenas o GCM que apresenta as características mais próximas às observadas.

Determinado o GCM, deu-se início à etapa de simulação climática. Nesta etapa os dados de precipitação e temperatura diária entre 2019 e 2099, referentes a cada cenário RCP do GCM selecionado, foram inseridos no SWAT+ individualmente através de quatro estações meteorológicas virtuais (Tabela 8 e Figura 18).

Figura 18 – Localização das Estações Virtuais



Fonte: Adaptado de CCJ (2018a e 2018b), ANA (2021) e 2w2e (2021).

Tabela 8 – Estações IPCC

ID	Nome	Latitude	Longitude	Elevação
1	262128	7095448.972	674780.220	713
2	262129	7150075.778	674780.220	920
3	263128	7095448.972	725685.581	97
4	263129	7150075.778	725685.581	319

Fonte: Adaptado de 2w2e (2021).

3.5.2.2 Análises efetuadas em C-2

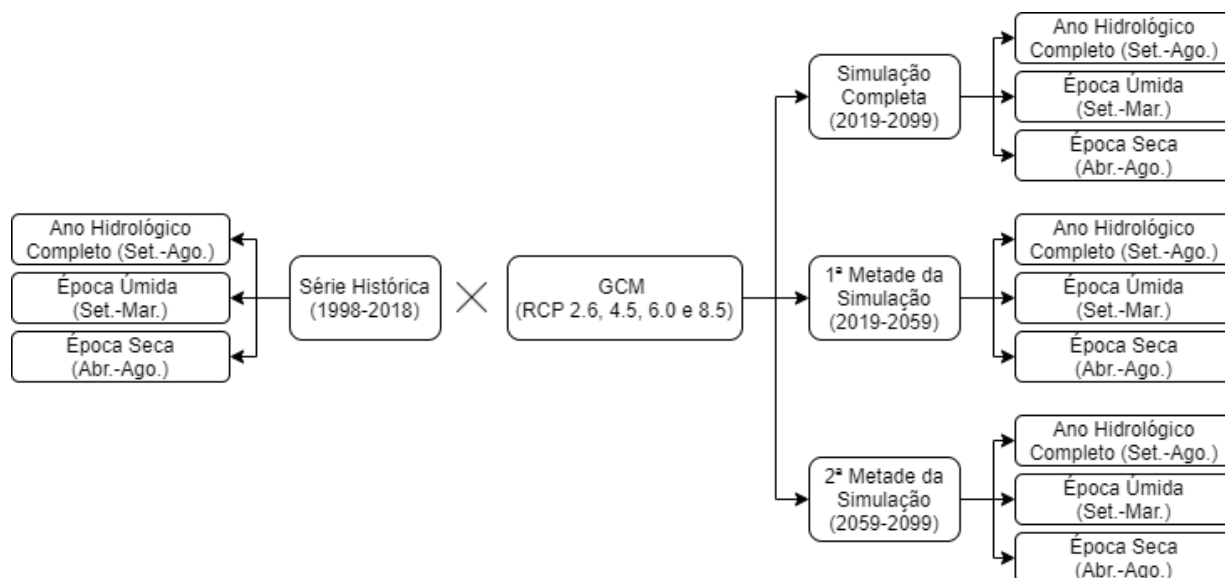
Na análise do C-2, ou seja, dos efeitos das mudanças, climáticas foram utilizados os quatro RCPs do GCM selecionado (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 e RCP 8,5) e apenas as informações de S.A. A avaliação de C-2 ocorreu em duas etapas: para o período de 2008-2018; para o período de 2019-2099. Esta divisão foi feita para estabelecer se há diferença entre os dados climáticos observados e os estimados, e caso haja, quantificá-la. Esta avaliação de uma possível diferença entre os dados observados e estimados se faz necessária devido à posição geográfica da estação meteorológica Pirabeiraba (cod. 2648033), fonte de dados da S.H. e da localização das estações virtuais. A estação Pirabeiraba se localiza na planície da BHRC e, como apresentado por Oliveira *et al.* (2017), o volume precipitado na planície é de cerca de 30% maior que no planalto. As estações virtuais, entretanto, estão distribuídas tanto na planície quanto no planalto.

Desse modo, na primeira etapa foram efetuadas diversas comparações: precipitação e temperatura observada da S.H. vs. precipitação e temperatura estimada pelo GCM; ET estimada com base nos dados climáticos observados vs. ET estimada com base nas informações do GCM; vazão observada vs. vazão gerada com base no GCM. Em todos os casos houve, ainda, a divisão em ano hidrológico completo, época úmida e época seca, mencionada em 3.5.

A segunda etapa de C-2 procurou comparar os valores de ET (estimada) e vazão da S.H., de 1998-2018, com aqueles gerados com base nos quatro RCPs para o período de 2019-2099. Entretanto, para avaliar se há uma evolução/tendência para o futuro, optou-se por dividir o período simulado em dois. A primeira metade de 2019-2059 e a segunda de 2059-2099. Assim, para a segunda etapa de C-2 foram considerados todos os casos apresentados na Figura 19. Além dos casos apresentados na Figura 19, foi feita a comparação entre os valores médios mensais

obtido para a 1ª metade da simulação com aqueles obtidos para a 2ª metade, revelando a existência, ou não, de uma possível tendência.

Figura 19 – Cenários avaliados na simulação (2ª Etapa)



Fonte: O Autor.

3.5.3 Cenário 3: Efeito Combinado

O terceiro cenário proposto, C-3, é a combinação das alterações de UOS e mudanças climática. Neste cenário foi considerado o S.A. quando se trata de dados da S.H. (ou gerados a partir de dados observados) e foi considerado o S.F. para os valores gerados a partir das informações dos RCPs. Assim como no item anterior, a avaliação de C-3 foi dividida em duas etapas. A primeira para o período de 2008-2018 e a segunda para o período de 2019-2099, descritas em 3.5.2.2. As variáveis analisadas neste item são a ET e a vazão, visto que a precipitação e temperaturas foram abordadas em 3.5.2.2.

3.5.4 Comparação C-2 vs. C-3

Visando determinar se a alteração do UOS tem influência significativa durante o período da simulação (2019-2099), foram comparados os resultados da vazão média mensal e ET média mensal, obtidos com cada UOS, para este período. Nesta

comparação foram utilizados todos os valores gerados com base nos dados climáticos do GCM, descritos na Figura 19.

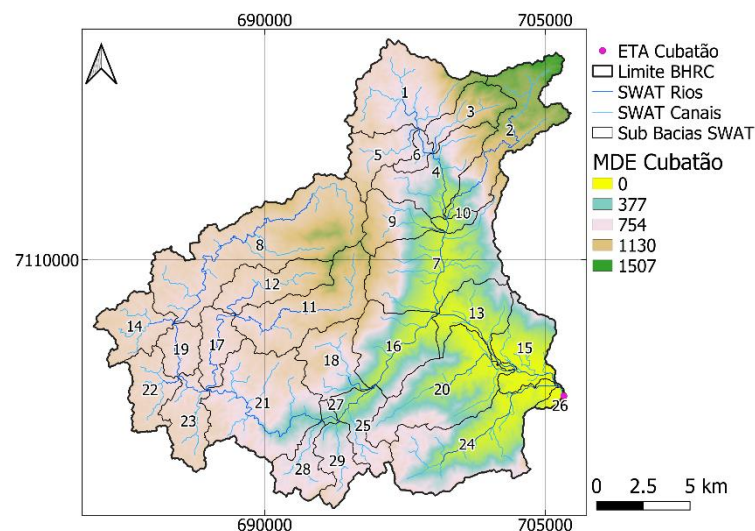
4 RESULTADOS

4.1 MODELAGEM

Após a obtenção de todas as informações necessárias, iniciou-se o processo de modelagem. Na primeira etapa, foram gerados os limites da bacia e sub-bacias, resultando na Figura 20, que ilustra o MDE com as sub-bacias e os canais e córregos gerados pelo SWAT+, além do exutório (ETA Cubatão) escolhido.

Após a definição das sub-bacias, deu-se início à geração das HRUs. De acordo com os dados de entrada, existem 29 sub-bacias, 263 seções de canais e 7575 HRUs em potencial na área de estudo. Ao efetuar a análise com os níveis de sensibilidade de HRUs mencionada no item 3.3.1.4, a quantidade final de HRUs utilizada no modelo foi de 4237 HRUs.

Figura 20 – Sub-bacias, Canais e Exutório



Fonte: O Autor.

4.2 SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Após as 1760 iterações da análise de sensibilidade, foram obtidos os resultados da Tabela 9. Observa-se que dos 10 parâmetros escolhidos, apenas 5 se

apresentaram relevantes ao modelo (sensibilidade maior que 0,05), estes estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros Relevantes

Parâmetro	Descrição	Tipo de Alteração	Sensibilidade
revap_co	Coeficiente de movimentação da água subterrânea	Substituição	0.508
z	Profundidade das camadas de solo	Porcentual	0.305
awc	Capacidade de armazenamento de água nas camadas de solo	Porcentual	0.061
epco	Fator de compensação de retenção pela vegetação	Substituição	0.056
CN2	Número de Curva	Porcentual	0.054
esco	Fator de Compensação de evaporação do solo	Substituição	0.020
k	Condutividade hidráulica saturada	Porcentual	0.010
flow_min	Valor mínimo armazenado no aquífero para ocorrer vazão reversa	Porcentual	0.001
canmx	Capacidade máxima de armazenamento das copas	Porcentual	-0.001
revap_min	Limite mínimo de "revap" para ocorrer percolação para o aquífero profundo	Substituição	-0.031

Fonte: O Autor.

Tendo em mão os parâmetros mais relevantes foi executada a calibração. Para tal, cada parâmetro foi alterado conforme a Tabela 10, e na mesma tabela são apresentadas as mudanças pertinentes a cada parâmetro. Apesar da calibração indicar que alguns parâmetros apresentem seu melhor resultado muito próximo ao limite estabelecido, como a profundidade total do solo (z), sugerindo que valores melhores possam ser obtidos, optou-se por não alterar tão drasticamente os valores originais de cada parâmetro, especialmente aqueles baseados em observações/literaturas.

Tabela 10 – Calibração dos Parâmetros

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Melhor Resultado
CN2	Porcentual	-30	50	49.525
esco	Substituição	0.01	1	0.015
epco	Substituição	0.01	1	0.013
canmx	Porcentual	-10	60	53.155
revap_co	Substituição	0.02	0.2	0.020
revap_min	Substituição	-30	30	26.730
flow_min	Porcentual	-30	30	-13.839
z	Porcentual	-60	60	59.480
awc	Porcentual	-30	30	-29.903
k	Porcentual	-20	20	19.621

Fonte: O Autor.

O modelo foi considerado calibrado após 500 iterações e posteriormente foi executada a etapa de validação. As estatísticas de precisão obtidas em cada uma destas etapas são apresentadas pela Tabela 11.

Tabela 11 – Estatísticas de Precisão Obtidas

	NSE	P_{bias}	R^2
Calibração	0.383	14.398	0.712
Validação	0.323	2.632	0.613

Fonte: O Autor.

Como pode ser observado, todas as estatísticas de precisão para o modelo apresentaram valores satisfatórios, exceto o NSE, que ficou aquém do recomendado pela bibliografia, entretanto acima do limite tido como aceitável, sob a justificativa de imprecisão dos valores de entrada.

Observa-se, pelos valores de P_{bias} , que o Modelo gera valores de vazões subestimadas em torno de 15%, ou seja, os valores gerados são cerca de 15% menores do que os valores observados para o período de calibração. Já para o período de validação são gerados valores entorno de 2,6% abaixo dos observados.

4.3 SIMULAÇÕES

4.3.1 C-1: Alteração de Uso e Ocupação

Para iniciar a simulação de alteração de uso e ocupação do solo e avaliar seu impacto na vazão do Rio Cubatão foi necessário gerar um novo modelo SWAT, utilizando o mapa de uso e ocupação da Figura 17, no qual foi aplicada a mesma calibração obtida para o modelo de S.A. Como consequência a quantidade de HRUs do modelo foi reduzida, visto que o uso do solo é uma das variáveis utilizadas para sua geração. Assim, para este novo modelo foram utilizadas 3438 HRUs.

A Tabela 12 apresenta os valores de vazão média mensal obtidos para o C-1. Também é apresentada a variação entre as vazões médias mensais observadas com as geradas a partir do S.A. e com aquelas geradas a partir do S.F.

Tabela 12 – Vazões C-1

Período	Observado (m³/s)	SWAT+ (m³/s)		Variação		
		S.A.	S.F.	S.A. vs. S.H.	S.F. vs. S.H.	S.A. vs. S.F.
Janeiro	29.28	32.05	31.68	8.6%	7.6%	-1.1%
Fevereiro	24.85	22.93	23.21	-8.4%	-7.1%	1.2%
Março	22.24	23.43	23.63	5.1%	5.9%	0.8%
Abril	16.92	11.54	12.20	-46.6%	-38.6%	5.7%
Mai	13.96	9.54	10.13	-46.3%	-37.8%	6.2%
Junho	14.12	10.59	10.90	-33.3%	-29.6%	2.8%
Julho	14.45	10.67	10.88	-35.5%	-32.8%	2.0%
Agosto	11.16	7.89	8.32	-41.5%	-34.1%	5.5%
Setembro	18.24	16.59	15.94	-10.0%	-14.4%	-3.9%
Outubro	21.38	17.74	17.28	-20.5%	-23.7%	-2.6%
Novembro	23.99	21.59	21.68	-11.1%	-10.7%	0.4%
Dezembro	23.22	15.05	15.45	-54.3%	-50.4%	2.6%
Ano Hid. Comp.	19.48	16.63	16.77	-17.1%	-16.1%	0.8%
Época Úmida:	23.31	21.34	21.27	-9.2%	-9.6%	-0.3%
Época Seca:	14.12	10.05	10.49	-40.6%	-34.7%	4.4%

Fonte: O Autor.

Observa-se que os valores de vazão gerados pelo SWAT+ condizem com a estatística P_{bias} , sendo 16-17% menores, na média, em relação à série histórica. Nota-se, ainda, que as maiores diferenças são em relação à época seca. Este resultado pode ser explicado em função das obras executadas pela companhia de abastecimento da cidade, visto que estas ocorrem para aumentar a cota d'água (época de baixa vazão). A comparação entre a vazão média mensal estimada entre S.A. e S.F. indica pouca variação, exceto para a época seca, onde os valores referentes à S.F. são 4,4% maiores.

A análise do teste t de Student (Tabela 13) revela que as vazões médias mensais observadas são estatisticamente maiores do que para as estimadas para S.A. e S.F., considerando o ano completo e a época seca. Entretanto, para a avaliação da época úmida tem-se não há variação estatisticamente significativa entre os valores observados e os estimados. Já a comparação entre S.A. e S.F. indica que apenas a época seca tem variação significativa.

Na mesma linha da Tabela 12, a Tabela 14 apresenta os resultados estimados para a ET. Entretanto, como não há registros de uma série histórica, são expostos apenas os valores gerados para S.A. e S.F.

Tabela 13 – Teste t de Student - Vazões C-1 (p-valor)

Comparação	Ano Completo	Época Úmida	Época Seca
Obs. > S.A.	2.68E-03	0.1875*	2.07E-04
Obs. > S.F.	2.42E-03	0.1613*	1.65E-04
S.F. > S.A.	0.2683*	0.6526*	3.19E-03

* Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

Tabela 14 – Evapotranspiração C-1

Período	ET SWAT (mm)		
	S.A.	S.F.	Variação
Janeiro	129.25	127.45	-1.4%
Fevereiro	108.86	108.09	-0.7%
Março	105.92	105.25	-0.6%
Abril	77.79	79.12	1.7%
Maio	58.10	59.04	1.6%
Junho	46.19	45.00	-2.6%
Julho	47.74	46.98	-1.6%
Agosto	58.19	59.10	1.6%
Setembro	67.78	68.92	1.7%
Outubro	88.73	87.41	-1.5%
Novembro	102.65	100.72	-1.9%
Dezembro	118.60	118.21	-0.3%
Ano Hid. Comp.	84.15	83.77	-0.4%
Época Úmida:	103.11	102.29	-0.8%
Época Seca:	57.60	57.85	0.4%

Fonte: O Autor.

Diferentemente das vazões, em nenhum dos períodos analisados foi observada variação estatisticamente significativa entre S.A. e S.F. (Tabela 15).

Tabela 15 – Teste t de Student - Evapotranspiração C-1 (p-valor)

Comparação	Ano Completo	Época Úmida	Época Seca
S.F. ≠ S.A.	0.2891	0.082	0.6544

Fonte: O Autor.

4.3.2 C-2: Mudanças Climáticas

4.3.2.1 Determinação do GCM

O primeiro passo da análise do efeito das mudanças climáticas foi determinar qual dos GCMs disponíveis deve ser utilizado. Na Tabela 16, são apresentados os

resultados da correlação de Pearson da precipitação de cada GCM em relação à série histórica (2008-2018), além do desvio padrão de cada série. Como pode ser observado, o GCM4 é aquele com maior correlação com os valores observados. Deste modo, o GCM4 foi escolhido como a fonte de dados climáticos futuros.

Tabela 16 – Comportamento da Precipitação Série Histórica vs. GCMs (2008-2018)

GCM / Série	Cenário	Pearson	Desv. Pad.	GCM / Série	Cenário	Pearson	Desv. Pad.
GCM1 GFDL-ESM2M	RCP 2.6	0.28	103.70	GCM4 MIROC-ESM-CHEM	RCP 2.6	0.32	98.16
	RCP 4.5	0.17	108.35		RCP 4.5	0.38	103.90
	RCP 6.0	0.40	107.94		RCP 6.0	0.29	99.97
	RCP 8.5	0.21	106.71		RCP 8.5	0.27	105.04
GCM2 HadGEM2-ES	RCP 2.6	0.22	92.37	GCM5 NorESM1-M	RCP 2.6	0.26	105.31
	RCP 4.5	0.23	95.21		RCP 4.5	0.18	100.34
	RCP 6.0	0.20	91.01		RCP 6.0	0.18	91.11
	RCP 8.5	0.30	86.81		RCP 8.5	0.20	94.60
GCM3 IPSL-CM5A-LR	RCP 2.6	0.25	116.49	Série Histórica	(2008-2018)		137.90
	RCP 4.5	0.26	109.09				
	RCP 6.0	0.24	129.04				
	RCP 8.5	0.37	126.41				

Fonte: O Autor.

4.3.2.2 C-2: Primeira Etapa

4.3.2.2.1 Precipitação

A primeira etapa da análise do efeito das mudanças climáticas (C-2) consistiu na comparação dos valores médios mensais de precipitação, temperatura, ET (estimada) e vazão das séries históricas vs. os valores referentes ao GCM4. Para estas comparações as séries foram consideradas sendo de 2008 a 2018.

A primeira variável analisada nesta etapa foi a precipitação. A comparação entre os valores de precipitação da média mensal histórica e simulada demonstra que, no geral, os valores simulados menores que os da série histórica, como visto na Tabela 17. A Tabela 18 apresenta o resultado do teste t de Student para as comparações. Observa-se que apenas o cenário de época úmida do RCP 4,5 não apresenta valores observados estatisticamente maiores do que os estimados pelo GCM4.

Tabela 17 – Precipitação Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)

GCM4	S.H.	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
	Prec. (°mm)	Prec. (°mm)	Variação S.H.	Prec. (°mm)	Variação S.H.	Prec. (°mm)	Variação S.H.	Prec. (°mm)	Variação S.H.
Janeiro	357.9	321.2	-10.2%	354.2	-1.0%	380.7	6.4%	301.1	-15.9%
Fevereiro	250.1	178.7	-28.5%	336.7	34.6%	207.8	-16.9%	267.7	7.0%
Março	297.7	164.3	-44.8%	178.7	-40.0%	168.0	-43.6%	166.2	-44.2%
Abril	177.3	140.7	-20.6%	110.9	-37.5%	113.8	-35.8%	114.0	-35.7%
Mai	146.1	118.0	-19.3%	90.6	-38.0%	139.5	-4.5%	99.2	-32.1%
Junho	162.9	130.1	-20.1%	123.4	-24.3%	82.2	-49.6%	98.8	-39.4%
Julho	141.5	120.4	-14.9%	78.0	-44.9%	96.3	-32.0%	102.9	-27.3%
Agosto	130.6	102.9	-21.3%	123.6	-5.4%	121.0	-7.4%	87.7	-32.9%
Setembro	169.4	139.8	-17.4%	168.4	-0.6%	161.2	-4.8%	143.6	-15.2%
Outubro	241.7	158.0	-34.6%	166.2	-31.2%	230.9	-4.5%	171.6	-29.0%
Novembro	294.0	133.5	-54.6%	143.6	-51.1%	175.1	-40.5%	170.7	-42.0%
Dezembro	247.4	236.6	-4.3%	258.3	4.4%	215.5	-12.9%	231.5	-6.4%
Ano Hid. Comp.	218.0	162.0	-25.7%	177.7	-18.5%	174.3	-20.1%	162.9	-25.3%
Ép. Úmida	265.5	190.3	-28.3%	229.5	-13.6%	219.9	-17.2%	207.5	-21.8%
Ép. Seca	151.7	122.4	-19.3%	105.3	-30.6%	110.6	-27.1%	100.5	-33.7%

Fonte: O Autor.

Tabela 18 – Teste t de Student – Precipitação - 1ª Etapa C-2 (p-valor)

Comparação	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Obs. > RCP 2.6	8.90E-04	5.79E-03	1.82E-04
Obs. > RCP 4.5	2.43E-02	2.93E-01*	6.55E-03
Obs. > RCP 6.0	4.05E-03	4.07E-02	2.40E-02
Obs. > RCP 8.5	3.88E-04	1.61E-02	3.19E-04

* Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

4.3.2.2.2 Temperatura

A segunda variável analisada na 1ª etapa de C-2 foi a temperatura. Esta análise se deu de modo análogo à análise da precipitação. Entretanto, ao contrário da precipitação, a temperatura média mensal observada se mostrou menor quando comparada àquela estimada nos RCPs do GCM4 (Tabela 19). Em todos os casos analisados, a temperatura maior do GCM4 é estatisticamente significativa (Tabela 20).

Tabela 19 – Temperatura Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)

GCM4	S.H.	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
	Temp. (°C)	Temp. (°C)	Variação S.H.	Temp. (°C)	Variação S.H.	Temp. (°C)	Variação S.H.	Temp. (°C)	Variação S.H.
Janeiro	27.0	28.8	6.6%	27.7	2.5%	28.7	6.2%	28.4	4.9%
Fevereiro	27.4	28.8	5.2%	28.6	4.4%	28.6	4.4%	28.3	3.2%
Março	26.1	27.9	6.8%	27.2	4.4%	27.8	6.4%	27.4	4.9%
Abril	24.6	25.4	3.2%	24.7	0.4%	25.1	2.1%	25.3	2.8%
Maio	22.0	23.9	8.6%	23.5	6.7%	23.4	6.4%	23.4	6.5%
Junho	19.7	22.1	12.3%	21.4	8.6%	22.3	13.2%	21.6	9.6%
Julho	19.0	23.2	21.8%	21.0	10.3%	22.2	16.5%	21.3	12.0%
Agosto	20.0	23.7	18.8%	22.1	10.6%	22.2	11.4%	21.6	8.3%
Setembro	20.3	23.7	16.8%	21.7	7.0%	22.8	12.4%	22.4	10.4%
Outubro	22.2	27.3	23.1%	23.2	4.4%	22.8	2.9%	23.2	4.7%
Novembro	24.3	27.7	13.8%	24.8	1.7%	25.0	2.8%	24.8	1.8%
Dezembro	26.1	28.6	9.5%	26.6	1.9%	27.0	3.4%	27.1	3.7%
Ano Hid. Comp.	23.2	25.9	12.2%	24.4	5.2%	24.8	7.3%	24.6	6.1%
Ép. Úmida	24.8	27.6	11.2%	25.7	3.6%	26.1	5.4%	25.9	4.7%
Ép. Seca	21.1	23.7	12.3%	22.5	7.0%	23.0	9.5%	22.6	7.6%

Fonte: O Autor.

Tabela 20 – Teste t de Student – Temperatura - 1ª Etapa C-2 (p-valor)

Comparação	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Obs. < RCP 2.6	7.42E-06	6.79E-04	6.75E-03
Obs. < RCP 4.5	3.10E-05	3.82E-04	7.48E-03
Obs. < RCP 6.0	2.58E-05	1.02E-03	6.32E-03
Obs. < RCP 8.5	2.89E-06	5.12E-04	2.02E-03

Fonte: O Autor.

4.3.2.2.3 Evapotranspiração

A terceira variável da 1ª etapa de C-2 foi a evapotranspiração. Como não há uma série histórica de medição de ET, estes valores foram gerados pelo SWAT+ com base na precipitação e temperatura observados. Também foi necessário gerar a ET de cada RCP pelo SWAT+, visto que o GCM4 fornece apenas a precipitação e temperatura diária. Todos os valores de ET gerados foram utilizados o método de Hargreaves (HARGREAVES; SAMANI, 1985). Após gerada a ET da série histórica, a análise desta variável se deu de modo análogo à precipitação e temperatura.

Assim como na análise da temperatura, os resultados da média mensal de ET referentes aos RCPs do GCM4 se mostraram maiores que os valores estimados para a série histórica (Tabela 21). Em todos os casos a diferença é considerada estatisticamente significativa (Tabela 22).

Tabela 21 – Evapotranspiração Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)

GCM4	S.H.	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
	ET (mm)	ET (mm)	Var. S.H.	ET (mm)	Var. S.H.	ET (mm)	Var. S.H.	ET (mm)	Var. S.H.
Janeiro	140.40	149.10	6.2%	141.40	0.7%	149.40	6.4%	145.00	3.3%
Fevereiro	114.94	127.00	10.5%	121.40	5.6%	122.24	6.4%	123.70	7.6%
Março	111.84	117.70	5.2%	106.56	-4.7%	121.40	8.5%	116.60	4.3%
Abril	85.02	86.89	2.2%	81.99	-3.6%	88.71	4.3%	89.44	5.2%
Maio	61.56	67.16	9.1%	66.05	7.3%	67.17	9.1%	66.73	8.4%
Junho	46.36	56.84	22.6%	51.12	10.3%	54.17	16.8%	52.16	12.5%
Julho	48.06	60.16	25.2%	58.02	20.7%	56.89	18.4%	56.11	16.7%
Agosto	60.10	70.32	17.0%	71.95	19.7%	68.76	14.4%	69.97	16.4%
Setembro	67.07	86.89	29.6%	88.48	31.9%	83.18	24.0%	89.82	33.9%
Outubro	94.01	106.32	13.1%	111.66	18.8%	107.50	14.3%	111.30	18.4%
Novembro	105.11	114.68	9.1%	120.20	14.4%	126.80	20.6%	123.90	17.9%
Dezembro	125.60	138.70	10.4%	129.50	3.1%	137.10	9.2%	134.70	7.2%
Ano Hid. Comp.	88.34	98.48	11.5%	95.69	8.3%	98.61	11.6%	98.29	11.3%
Ép. Úmida	108.42	120.06	10.7%	117.03	7.9%	121.09	11.7%	120.72	11.3%
Ép. Seca	60.22	68.27	13.4%	65.83	9.3%	67.14	11.5%	66.88	11.1%

Fonte: O Autor.

Tabela 22 – Teste t de Student – Evapotranspiração - 1ª Etapa C-2 (p-valor)

Comparação	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Est. S.H. < RCP 2.6	4.28E-06	2.12E-04	6.48E-03
Est. S.H. < RCP 4.5	4.73E-03	2.87E-02	4.83E-02
Est. S.H. < RCP 6.0	7.96E-06	2.55E-04	1.10E-03
Est. S.H. < RCP 8.5	8.97E-05	2.08E-03	1.34E-03

Fonte: O Autor.

4.3.2.2.4 Vazão

A última variável da 1ª etapa de C-2 foi a vazão. Para esta variável foi comparada a vazão média mensal observada com aquela gerada pelo SWAT+ para cada RCP do GCM4. As vazões médias mensais geradas se mostraram muito inferiores às observadas (Tabela 23). Em todos os casos essa diferença se mostrou estatisticamente significativa (Tabela 24).

Tabela 23 – Vazão Média Mensal - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)

GCM4	S.H.	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
	V. (m³/s)	V. (m³/s)	Var. S.H.	V. (m³/s)	Var. S.H.	V. (m³/s)	Var. S.H.	V. (m³/s)	Var. S.H.
Janeiro	30.70	19.99	-34.9%	20.76	-32.4%	20.47	-33.3%	18.30	-40.4%
Fevereiro	25.40	15.46	-39.1%	16.95	-33.3%	14.62	-42.5%	28.63	12.7%
Março	26.95	8.87	-67.1%	10.48	-61.1%	10.84	-59.8%	15.62	-42.1%
Abril	20.25	7.31	-63.9%	8.37	-58.6%	6.73	-66.8%	7.46	-63.2%
Mai	16.99	7.22	-57.5%	6.49	-61.8%	4.56	-73.2%	8.31	-51.1%
Junho	19.54	8.39	-57.1%	5.22	-73.3%	3.20	-83.6%	8.91	-54.4%
Julho	17.77	9.40	-47.1%	5.97	-66.4%	6.43	-63.8%	8.51	-52.1%
Agosto	14.33	5.02	-64.9%	6.88	-52.0%	6.30	-56.0%	7.22	-49.6%
Setembro	17.23	7.43	-56.9%	13.31	-22.8%	7.54	-56.2%	7.52	-56.3%
Outubro	23.64	5.63	-76.2%	8.71	-63.1%	10.27	-56.5%	9.92	-58.0%
Novembro	26.92	3.39	-87.4%	9.34	-65.3%	8.74	-67.5%	8.31	-69.1%
Dezembro	26.46	8.84	-66.6%	11.05	-58.2%	9.89	-62.6%	6.81	-74.3%
Ano Hid. Comp.	22.18	8.91	-59.8%	10.29	-53.6%	9.13	-58.8%	11.29	-49.1%
Ép. Úmida	25.33	9.94	-60.7%	12.94	-48.9%	11.77	-53.5%	13.59	-46.4%
Ép. Seca	17.78	7.47	-58.0%	6.59	-63.0%	5.44	-69.4%	8.08	-54.5%

Fonte: O Autor.

4.3.2.3 C-2: Segunda Etapa

4.3.2.3.1 Precipitação

A primeira variável analisada na 2ª etapa da avaliação dos efeitos das mudanças climáticas (C-2) foi a precipitação. Nesta etapa a precipitação média mensal da série histórica (1998-2018) foi comparada com os valores estimados para cada RCP do GCM4 (2019-2099), através dos casos apresentados na Figura 19. Os valores obtidos estão apresentados no Apêndice A e os resultados do teste t de Student são apresentados pela Tabela 25.

Através dos dados obtidos é possível observar que a média mensal da precipitação da 1ª metade da simulação (2019-2059) de 13-19% menor que a média mensal da série histórica quando considerado o ano completo. O mesmo ocorre ao considerar a época úmida (14-20% menor) e a época seca (12-17% menor). Apenas a época seca do RCP 4,5 é considerada sendo estatisticamente igual à série histórica.

Tabela 24 – Teste t de Student – Precipitação – 2ª Etapa C-2 (p-valor)

Precipitação Média Mensal - Série Histórica vs. GCM4			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Série Histórica > RCP 2.6_1ª Met.	1.04E-03	4.23E-03	3.52E-02
Série Histórica > RCP 2.6_2ª Met.	3.44E-04	6.86E-03	1.04E-02
Série Histórica > RCP 2.6_Total	4.27E-04	4.95E-03	8.12E-03
Série Histórica > RCP 4.5_1ª Met.	8.95E-03	2.71E-02	0.2080*
Série Histórica > RCP 4.5_2ª Met.	5.05E-04	1.04E-02	2.19E-04
Série Histórica > RCP 4.5_Total	2.16E-03	1.67E-02	1.43E-02
Série Histórica > RCP 6.0_1ª Met.	1.75E-03	1.15E-02	1.63E-02
Série Histórica > RCP 6.0_2ª Met.	1.49E-02	0.1147*	0.1215*
Série Histórica > RCP 6.0_Total	3.47E-03	2.39E-02	2.82E-03
Série Histórica > RCP 8.5_1ª Met.	2.22E-03	9.94E-03	3.84E-02
Série Histórica > RCP 8.5_2ª Met.	0.1453*	0.1730*	0.6784*
Série Histórica > RCP 8.5_Total	1.28E-02	2.83E-02	0.2966*
Comparação 1ª Metade -> 2ª Metade			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
RCP 2.6_2ª Met. > RCP 2.6_1ª Met.	0.6395*	0.4239*	0.2789*
RCP 4.5_2ª Met. > RCP 4.5_1ª Met.	0.3005*	0.6340*	0.4017*
RCP 6.0_2ª Met. > RCP 6.0_1ª Met.	0.1979*	4.96E-02	0.8434*
RCP 8.5_2ª Met. > RCP 8.5_1ª Met.	3.50E-02	1.33E-01	4.03E-01

* - Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

Analisando 2ª metade do período simulado em relação à série histórica, notam-se os sinais da alteração climática de acordo com concentração de gases do efeito estufa (GEE). Comparando os valores para o ano completo há uma tendência de aumento da precipitação do RCP 2,6 ao RCP 8,5, de um valor 20,3% menor que da série histórica até um valor 9,1% menor. Considerando a separação entre época úmida e seca, têm-se que, para a época úmida, apenas os RCPs 2,6 e 4,5 se mostram estatisticamente menores que a precipitação da série histórica. E na época seca apenas o RCP 2,6 tem essa característica. Ambas as épocas, úmida e seca, mostram o mesmo comportamento de crescimento da precipitação, na 2ª metade da série simulada, de acordo com o aumento da concentração dos GEE.

Foi observada uma tendência de crescimento da precipitação média mensal entre a 1ª metade do período de simulação e a 2ª metade para a época úmida do RCP 6,0 e todos os cenários do RCP 8,5 (Tabela 25).

4.3.2.3.2 Temperatura

Da mesma forma que executada para precipitação média mensal, foi feita a comparação das temperaturas médias mensais da 2ª etapa do C-2. Os resultados desta comparação são apresentados no Apêndice B. A Tabela 26 expõem os resultados do teste t de Student executados para determinação da significância, ou não, entre as comparações.

Tabela 25 – Teste t de Student – Temperatura – 2ª Etapa C-2 (p-valor)

Temperatura Média Mensal - Série Histórica vs. GCM4			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Série Histórica < RCP 2.6_1ª Met.	1.29E-06	1.73E-04	1.21E-03
Série Histórica < RCP 2.6_2ª Met.	3.72E-09	4.48E-06	5.05E-04
Série Histórica < RCP 2.6_Total	6.16E-08	1.81E-05	7.74E-04
Série Histórica < RCP 4.5_1ª Met.	8.19E-08	4.55E-06	1.55E-03
Série Histórica < RCP 4.5_2ª Met.	1.90E-08	1.20E-06	8.46E-04
Série Histórica < RCP 4.5_Total	2.71E-08	1.83E-06	9.69E-04
Série Histórica < RCP 6.0_1ª Met.	8.01E-09	2.52E-06	4.00E-04
Série Histórica < RCP 6.0_2ª Met.	4.77E-09	8.88E-07	3.40E-04
Série Histórica < RCP 6.0_Total	5.15E-09	1.04E-06	3.57E-04
Série Histórica < RCP 8.5_1ª Met.	2.38E-08	1.30E-05	5.49E-04
Série Histórica < RCP 8.5_2ª Met.	1.18E-11	2.05E-07	7.73E-05
Série Histórica < RCP 8.5_Total	2.76E-10	9.07E-07	1.90E-04
Comparação 1ª Metade -> 2ª Metade			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
RCP 2.6_2ª Met. > RCP 2.6_1ª Met.	0.8527*	0.1796*	0.1184*
RCP 4.5_2ª Met. > RCP 4.5_1ª Met.	4.92E-07	6.57E-06	3.73E-03
RCP 6.0_2ª Met. > RCP 6.0_1ª Met.	4.77E-09	8.88E-07	3.40E-04
RCP 8.5_2ª Met. > RCP 8.5_1ª Met.	9.01E-10	2.54E-06	1.72E-06

* - Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

A partir das informações do Apêndice B nota-se que a média mensal de temperatura de todos os RCPs é maior que a média mensal de temperatura da série histórica. Para a 1ª metade da simulação, o cenário de ano hidrológico completo apresenta temperaturas médias mensais de 8,6% - 13,1% maiores que da série histórica. Ao considerar a época úmida essa variação é de 6,9% - 10,7% e, para a época seca é de 10,3% - 15,7%.

A segunda metade da simulação apresenta o mesmo comportamento. Para o cenário de ano hidrológico completo a temperatura média mensal referente ao GCM4

é 10,6% – 21,8% maior que aquela observada. Essa diferença é menos intensa para a época úmida (9,2% - 19,6%) e mais intensa para a época seca (12,1% - 23,9%).

A análise dos valores obtidos entre a 1ª e 2ª metade da simulação revela, ainda, crescimento da temperatura média mensal ao longo do tempo em quase todos os RCP. Apenas o RCP 2,6 apresenta a temperatura média mensal sem variação estatisticamente significativa. Este resultado já era esperado, visto que a tendência dos cenários RCPs é a estagnação ou aumento da temperatura (IPCC, 2019a; SILVEIRA *et al.*, 2013).

4.3.2.3.3 Evapotranspiração

Assim como na 1ª etapa de C-2 a terceira variável analisada na 2ª etapa foi a evapotranspiração. Os valores das comparações estão apresentados no Apêndice C enquanto a Tabela 27 expõem o resultado da análise dos testes t de Student realizados.

Tabela 26 – Teste t de Student – Evapotranspiração – 2ª Etapa C-2 (p-valor)

Evapotranspiração Média Mensal - Série Histórica Estimada vs. GCM4			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Série Histórica < RCP 2.6_1ª Met.	9.24E-07	3.78E-05	2.04E-04
Série Histórica < RCP 2.6_2ª Met.	9.75E-06	1.29E-05	6.60E-05
Série Histórica < RCP 2.6_Total	2.51E-06	1.70E-05	3.41E-05
Série Histórica < RCP 4.5_1ª Met.	4.33E-06	5.03E-05	4.38E-04
Série Histórica < RCP 4.5_2ª Met.	2.52E-06	5.87E-06	2.17E-04
Série Histórica < RCP 4.5_Total	2.94E-06	1.71E-05	2.25E-04
Série Histórica < RCP 6.0_1ª Met.	2.12E-06	4.78E-05	5.48E-04
Série Histórica < RCP 6.0_2ª Met.	1.18E-05	8.59E-05	8.00E-04
Série Histórica < RCP 6.0_Total	4.71E-06	6.23E-05	4.62E-04
Série Histórica < RCP 8.5_1ª Met.	1.62E-06	4.94E-05	3.13E-04
Série Histórica < RCP 8.5_2ª Met.	2.54E-05	3.02E-05	4.00E-04
Série Histórica < RCP 8.5_Total	6.31E-06	2.93E-05	2.37E-04
Comparação 1ª Metade -> 2ª Metade			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
RCP 2.6_2ª Met. > RCP 2.6_1ª Met.	0.8864*	0.1063*	0.08751*
RCP 4.5_2ª Met. > RCP 4.5_1ª Met.	0.3097*	0.2136*	0.8881*
RCP 6.0_2ª Met. < RCP 6.0_1ª Met.	4.24E-03	0.06013*	0.07727*
RCP 8.5_2ª Met. > RCP 8.5_1ª Met.	0.2296*	7.89E-03	0.05594*

* - Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

Como pode ser observado pelos valores do Apêndice C e da Tabela 27, a média mensal da ET estimada com base no GCM4 é maior que a ET estimada com base nos dados observados em todos os casos propostos. Considerando a comparação com a 1ª metade da simulação, a ET média mensal estimada dos RCPs é de 14,8% a 19,6% maior que a estimada para a série histórica, para o caso do ano hidrológico completo. A diferença é ainda maior ao considerar apenas a época úmida (15,4% - 19,7%). Já a época seca apresenta uma diferença menor (13,3% - 19,3%).

Ao considerar a 2ª metade da simulação os valores da ET média mensal estimada para o GCM4 permanecem quase inalterados quando comparados com a 1ª metade. Apenas o cenário de ano hidrológico completo do RCP 6,0 e época úmida do RCP 8,5 apresentam diferença estatisticamente significativa. O primeiro apresenta redução (1,8%) entre as duas metades da simulação e, o segundo, apresenta aumento (4,6%).

4.3.2.3.4 Vazão

As comparações da vazão média mensal da 2ª etapa do C-2 são apresentadas no Apêndice D. A Tabela 28 expõem os resultados dos testes t de Student realizados para cada caso proposto. Em todos os cenários foi observado que a vazão média mensal estimada é menor que a vazão média mensal observada.

Para a comparação dos valores observados com aqueles estimados para a 1ª metade da simulação têm-se que a vazão média mensal estimada é 41,0% a 48,9% menor que a observada, ao considerar o cenário de ano completo. Considerando apenas a época úmida este percentual é de 38,6% a 46,1% e, para a época seca é de 46,1% a 55,3% menor que os valores observados.

Entre a 1ª metade da simulação e a 2ª apenas os RCP 6,0 e 8,5 apresentam variação significativa. Ambos mostram aumento da vazão para o cenário de ano hidrológico completo (11,3% e 12,1%, respectivamente) e época úmida (13,0 e 9,5%, respectivamente).

Como pode ser observado, a vazão gerada pelo modelo para os cenários RCPs é consideravelmente menor que a vazão referente à série histórica. Isto é explicado através de quatro pontos: diferença na precipitação, diferença na temperatura, leituras da série histórica e características do modelo SWAT+ em si.

Tabela 27 – Teste t de Student - Vazão 2ª Etapa C-2 (p-valor)

Vazão Média Mensal Estimada - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Série Histórica > RCP 2.6_1ª Met.	2.78E-06	6.17E-04	3.58E-04
Série Histórica > RCP 2.6_2ª Met.	2.88E-06	1.23E-03	4.30E-04
Série Histórica > RCP 2.6_Total	1.88E-06	7.69E-04	2.37E-04
Série Histórica > RCP 4.5_1ª Met.	1.02E-05	9.63E-04	2.52E-03
Série Histórica > RCP 4.5_2ª Met.	1.14E-07	1.28E-04	4.08E-05
Série Histórica > RCP 4.5_Total	1.10E-06	3.50E-04	4.34E-04
Série Histórica > RCP 6.0_1ª Met.	5.16E-08	2.80E-05	1.25E-04
Série Histórica > RCP 6.0_2ª Met.	2.89E-05	3.40E-03	1.53E-03
Série Histórica > RCP 6.0_Total	6.32E-07	3.43E-04	9.25E-05
Série Histórica > RCP 8.5_1ª Met.	6.33E-07	1.42E-04	4.91E-04
Série Histórica > RCP 8.5_2ª Met.	3.03E-05	2.47E-04	2.47E-02
Série Histórica > RCP 8.5_Total	1.87E-06	1.11E-04	3.14E-03
Comparação 1ª Metade -> 2ª Metade			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
RCP 2.6_2ª Met. > RCP 2.6_1ª Met.	0.7662*	0.2265*	0.3076*
RCP 4.5_2ª Met. > RCP 4.5_1ª Met.	0.5773*	0.9167*	0.4901*
RCP 6.0_2ª Met. > RCP 6.0_1ª Met.	1.46E-02	1.76E-02	0.4919*
RCP 8.5_2ª Met. > RCP 8.5_1ª Met.	8.66E-03	4.53E-02	0.1544*

* - Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

O primeiro ponto, diferença na precipitação, se resume no volume de precipitação considerado. Como apresentado no item 4.3.2.1, o volume precipitado considerado na série histórica tem como base a estação de Pirabeirada, localizada na região de planície da BHRC, local com precipitação muito mais elevada que as regiões de serra e planalto (OLIVEIRA *et. al.*, 2017). Já três das quatro estações virtuais utilizadas são considerados em cota elevada, de 319, 713 e 920 m (Tabela 8). Como mostrado na mesma seção citada, a precipitação referente aos cenários RCPs é de 18,5 a 25,7% menor que da série histórica para o período. Com menor volume de água entrando no sistema através da precipitação, menor é o volume de saída através do escoamento superficial, neste caso, vazão do Rio Cubatão.

Somado à menor precipitação, os cenários RCPs apresentam uma maior temperatura mensal média (ver seção 4.3.2.2), que por sua vez eleva a evapotranspiração (ver seção 4.3.2.3). Assim como a vazão de um rio, a ET também é uma forma de saída de água da BHRC e, como a ET estimada para os RCPs é de 8,3 a 11,6% maior que da série histórica, há uma redução do valor estimado para a vazão do Rio Cubatão.

O terceiro ponto a ser levantado diz respeito às leituras de vazão da série histórica. Como mencionado anteriormente, a jusante do ponto de leitura da vazão está localizada a captação de água para o abastecimento público. Em épocas de baixas vazões são feitas obras no enrocamento mencionado para aumentar a cota d'água. Essa alteração gera um valor de vazão irreal. A informação não é registrada pela empresa de saneamento e nem repassada aos responsáveis pela inserção dos dados no HIDROWEB. Assim, é possível que diversas leituras de vazão da série histórica estejam superestimadas devido ao efeito de remanso do provocado pelo enrocamento.

Por fim, deve-se considerar que nenhum modelo hidrológico é perfeito e, como mostram as características de precisão obtidas para o modelo SWAT+ neste trabalho o P_{bias} mostra uma vazão cerca de 15% menor entre a vazão observada e a simulada para a calibração.

4.3.3 C-3: Efeito combinado

Assim como no C-2, o cenário C-3, de efeito combinado de alteração do uso e ocupação do solo com mudanças climáticas, também foi dividido em duas etapas. A primeira avaliando o período de 2008-2018 e, a segunda, utilizando o período de 1998-2018 para as séries históricas e 2019-2099 para as séries simuladas. Nas duas etapas as informações sobre a série histórica utilizaram os dados de uso e ocupação do solo atual (S.A.) e as séries simuladas utilizaram as informações do uso e ocupação do solo futuro (S.F.).

4.3.3.1 C-3: Primeira Etapa

4.3.3.1.1 Evapotranspiração

A primeira das duas variáveis avaliadas para o efeito combinado é a evapotranspiração. A valores comparados da série histórica estimada de ET média mensal, gerada com a precipitação e temperatura observadas, vs. a ET média mensal estima para cada RCP é apresentada na Tabela 29. A Tabela 30 apresenta os resultados dos testes t de Student realizados nas comparações da ET média mensal desta etapa.

Como pode ser observado, em praticamente todos os casos a ET média mensal estimada com base no GCM4 e S.F. é maior que a estimada com base nos dados da série histórica e S.A. Apenas a época úmida e seca do RCP 4,5 não apresenta este comportamento. Em ambos não é observada diferença estatisticamente significativa.

Tabela 28 – ET Média Mensal Estimada C-3 - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)

GCM4	S.H.	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP6.0		RCP 8.5	
	ET (mm)	ET (mm)	Var. S.H.	ET (mm)	Var. S.H.	ET (mm)	ET (mm)	Var. S.H.	ET (mm)
Janeiro	140.40	144.40	2.8%	137.60	-2.0%	144.80	3.1%	140.40	0.0%
Fevereiro	114.94	123.20	7.2%	118.15	2.8%	118.97	3.5%	120.50	4.8%
Março	111.84	116.90	4.5%	106.46	-4.8%	120.90	8.1%	115.50	3.3%
Abril	85.02	87.72	3.2%	82.73	-2.7%	89.50	5.3%	90.41	6.3%
Mai	61.56	65.72	6.8%	65.07	5.7%	65.83	6.9%	66.48	8.0%
Junho	46.36	55.23	19.1%	49.75	7.3%	52.28	12.8%	50.89	9.8%
Julho	48.06	58.10	20.9%	56.21	17.0%	55.16	14.8%	54.27	12.9%
Agosto	60.10	68.10	13.3%	69.55	15.7%	66.75	11.1%	67.81	12.8%
Setembro	67.07	84.53	26.0%	86.24	28.6%	81.14	21.0%	87.46	30.4%
Outubro	94.01	103.50	10.1%	108.43	15.3%	104.41	11.1%	108.40	15.3%
Novembro	105.11	111.37	6.0%	116.90	11.2%	123.40	17.4%	120.30	14.5%
Dezembro	125.60	134.60	7.2%	126.10	0.4%	133.70	6.4%	130.60	4.0%
Ano Hid. Comp.	88.34	96.11	10.6%	93.60	7.9%	96.40	10.1%	96.09	10.2%
Ép. Úmida	108.42	116.93	7.8%	114.27	5.4%	118.19	9.0%	117.59	8.5%
Ép. Seca	60.22	66.97	11.2%	64.66	7.4%	65.90	9.4%	65.97	9.6%

Fonte: O Autor.

Tabela 29 – Teste t de Student – Evapotranspiração - 1ª Etapa C-3 (p-valor)

Comparação	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Est. S.H. < RCP 2.6	1.29E-05	1.16E-03	4.40E-03
Est. S.H. < RCP 4.5	1.65E-02	1.49E-01*	9.90E-02*
Est. S.H. < RCP 6.0	2.65E-05	1.16E-03	2.79E-04
Est. S.H. < RCP 8.5	3.84E-04	8.73E-03	2.60E-04

* Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

4.3.3.1.2 Vazão

De modo análogo ao realizado para a ET média mensal desta etapa, a Tabela 32 apresenta os valores de comparação da vazão média mensal observada vs. a vazão média mensal estimada com base nos dados GCM4 e S.F. Os resultados do teste de significância são expostos pela Tabela 31.

Como esperado, devido aos resultados obtidos para C-2, todos os casos avaliados mostram que a vazão média mensal estimada, com ambas as alterações do solo e climáticas, é menor que a vazão média mensal observada. O motivo para isto ocorrer, como descrito no item 4.3.2.3.4, é devido a menor precipitação estimada pelos RCPs, maior temperatura estimada (acarretando maior ET), possíveis leituras superestimadas da vazão observada.

Tabela 30 – Teste t de Student – Vazão - 1ª Etapa C-3 (p-valor)

Comparação	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Obs. > RCP 2.6	6.87E-07	1.58E-04	1.20E-04
Obs. > RCP 4.5	4.27E-07	3.92E-04	3.06E-04
Obs. > RCP 6.0	1.39E-08	2.75E-05	4.76E-04
Obs. > RCP 8.5	2.78E-05	3.71E-03	3.00E-04

Fonte: O Autor.

Tabela 31 – Vazão Média Mensal Estimada C-3 - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)

GCM4	S.H.	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP6.0		RCP 8.5	
	V. (m³/s)	V. (m³/s)	Var. S.H.	V. (m³/s)	Var. S.H.	V. (m³/s)	V. (m³/s)	Var. S.H.	V. (m³/s)
Janeiro	30.70	20.67	-32.7%	21.37	-30.4%	21.01	-31.6%	18.87	-38.5%
Fevereiro	25.40	15.96	-37.2%	17.28	-32.0%	15.13	-40.4%	29.12	14.6%
Março	26.95	9.09	-66.3%	10.68	-60.4%	11.06	-58.9%	15.83	-41.2%
Abril	20.25	7.31	-63.9%	8.37	-58.7%	6.71	-66.9%	7.46	-63.2%
Maio	16.99	7.24	-57.4%	6.50	-61.8%	4.64	-72.7%	8.30	-51.1%
Junho	19.54	8.58	-56.1%	5.37	-72.5%	3.30	-83.1%	9.01	-53.9%
Julho	17.77	9.55	-46.3%	6.11	-65.6%	6.60	-62.9%	8.65	-51.3%
Agosto	14.33	5.23	-63.5%	7.10	-50.4%	6.60	-53.9%	7.38	-48.5%
Setembro	17.23	7.75	-55.1%	13.72	-20.4%	7.76	-55.0%	7.86	-54.4%
Outubro	23.64	5.94	-74.9%	9.07	-61.6%	10.75	-54.5%	10.30	-56.4%
Novembro	26.92	3.75	-86.1%	9.71	-63.9%	9.14	-66.1%	8.70	-67.7%
Dezembro	26.46	9.51	-64.1%	11.44	-56.8%	10.39	-60.7%	7.35	-72.2%
Ano Hid. Comp.	22.18	9.21	-58.6%	10.56	-52.9%	9.42	-58.9%	11.57	-48.7%
Ép. Úmida	25.33	10.38	-59.0%	13.33	-47.4%	12.18	-51.9%	14.01	-44.7%
Ép. Seca	17.78	7.58	-57.3%	6.69	-62.4%	5.57	-68.7%	8.16	-54.1%

Fonte: O Autor.

4.3.3.2 C-3: Segunda Etapa

A segunda etapa de C-3 compara os valores da série histórica (1998-2018) com o S.A. vs. os valores gerados a partir do GCM4 (2019-2099) com o S.F. Assim como

na segunda etapa do C-2, no C-3 também houve a separação do período simulado em duas metades.

4.3.3.2.1 Evapotranspiração

A comparação dos valores da ET média mensal estimada desta etapa é apresentada pelo Apêndice E. O resultado dos testes t de Student referentes às comparações feitas é exposto pela Tabela 33.

Tabela 32 – Teste t de Student – Evapotranspiração – 2ª Etapa C-3 (p-valor)

Evapotranspiração Média Mensal - Série Histórica Estimada vs. RCPs (2008-2018)			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Série Histórica < RCP 2.6_1ª Met.	6.57E-07	4.34E-05	9.80E-05
Série Histórica < RCP 2.6_2ª Met.	1.02E-05	4.83E-06	6.93E-04
Série Histórica < RCP 2.6_Total	1.97E-06	1.05E-05	6.87E-05
Série Histórica < RCP 4.5_1ª Met.	4.81E-06	7.58E-05	3.66E-04
Série Histórica < RCP 4.5_2ª Met.	2.89E-06	5.85E-06	7.89E-05
Série Histórica < RCP 4.5_Total	3.18E-06	2.11E-05	1.26E-04
Série Histórica < RCP 6.0_1ª Met.	1.23E-06	3.69E-05	3.45E-04
Série Histórica < RCP 6.0_2ª Met.	1.17E-05	6.86E-05	9.19E-04
Série Histórica < RCP 6.0_Total	3.57E-06	4.84E-05	3.52E-04
Série Histórica < RCP 8.5_1ª Met.	1.21E-06	5.63E-05	3.23E-04
Série Histórica < RCP 8.5_2ª Met.	2.71E-05	1.82E-05	1.36E-03
Série Histórica < RCP 8.5_Total	5.48E-06	2.13E-05	5.19E-04
Comparação 1ª Metade -> 2ª Metade			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
RCP 2.6_2ª Met. > RCP 2.6_1ª Met.	0.9087*	0.102*	0.06871*
RCP 4.5_2ª Met. > RCP 4.5_1ª Met.	0.3234*	0.1802*	0.6566*
RCP 6.0_2ª Met. < RCP 6.0_1ª Met.	4.67E-03	0.09651*	0.05152*
RCP 8.5_2ª Met. > RCP 8.5_1ª Met.	0.2304*	6.71E-03	1.10E-02**

* - Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

** - Teste unilateral de hipótese alternativa "menor".

Fonte: O Autor.

Observa-se que em todos os casos avaliados a ET média mensal estimada para o período de simulação é maior que seu valor referente à série histórica. Ao considerar o cenário de ano hidrológico completo da 1ª metade da simulação, têm-se que diferença é de 12,1% a 16,8%, para a época úmida é de 12,5% a 16,7% e, para a época seca é de 11,1% a 17,1%.

Entretanto, ao considerar a variação entre a 1ª e 2ª metades da simulação, apenas em três casos a diferença é considerada significativa, sendo eles: ano

completo RCP 6,0 (redução de 1,6%); época úmida RCP 8,5 (aumento de 4,6%) e; época seca RCP 8,5 (redução 4,4%). A análise da evolução entre as duas metades da simulação indica uma possível tendência no aumento da ET da época úmida e redução na época seca.

4.3.3.2.2 Vazão

De modo similar ao apresentado para a ET, os resultados da simulação completa, de cada metade e suas subdivisões em época úmida e seca são informados no Apêndice F, com os resultados da significância de comparações na Tabela 34.

Tabela 33 – Teste t de Student - Vazão – 2ª Etapa C-3 (p-valor)

Vazão Média Mensal Estimada - Série Histórica vs. RCPs (2008-2018)			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
Série Histórica > RCP 2.6_1ª Met.	3.41E-06	7.65E-04	4.31E-04
Série Histórica > RCP 2.6_2ª Met.	4.02E-06	1.60E-03	4.51E-04
Série Histórica > RCP 2.6_Total	2.45E-06	9.80E-04	2.68E-04
Série Histórica > RCP 4.5_1ª Met.	1.33E-05	1.23E-03	2.89E-03
Série Histórica > RCP 4.5_2ª Met.	1.47E-07	1.74E-04	4.75E-05
Série Histórica > RCP 4.5_Total	1.42E-06	4.61E-04	5.03E-04
Série Histórica > RCP 6.0_1ª Met.	5.95E-08	3.85E-05	1.50E-04
Série Histórica > RCP 6.0_2ª Met.	4.46E-05	4.58E-03	1.75E-03
Série Histórica > RCP 6.0_Total	8.92E-07	4.71E-04	1.14E-04
Série Histórica > RCP 8.5_1ª Met.	7.19E-07	1.80E-04	5.47E-04
Série Histórica > RCP 8.5_2ª Met.	4.28E-05	3.82E-04	2.71E-02
Série Histórica > RCP 8.5_Total	2.31E-06	1.55E-04	3.46E-03
Comparação 1ª Metade -> 2ª Metade			
Cenário	Ano Hidrológico Completo	Época Úmida	Época Seca
RCP 2.6_2ª Met. > RCP 2.6_1ª Met.	0.7605*	0.2180*	0.3044*
RCP 4.5_2ª Met. > RCP 4.5_1ª Met.	0.5864*	0.9205*	0.5045*
RCP 6.0_2ª Met. > RCP 6.0_1ª Met.	1.53E-02	1.85E-02	0.4939*
RCP 8.5_2ª Met. > RCP 8.5_1ª Met.	9.22E-03	4.64E-02	0.1600*

* - Teste bilateral de hipótese nula igual a zero.

Fonte: O Autor.

Do mesmo modo que as vazões estimadas para C-2 (apenas mudança climática), os resultados gerados para a vazão média mensal de C-3 são menores que os valores da série histórica para todos os cenários avaliados, comportamento, novamente, esperado, visto a diferença da vazão estimada para o clima histórico com àquela gerada no C-3. Outra similaridade com o C-2 está na análise da evolução entre

a 1ª e 2ª metades da simulação. Em ambos os cenários RCP 6,0 e 8,5 se mostram os únicos com variações estatisticamente significativa das vazões, no caso do C-3 essa variação condiz a um aumento de 11% e 12% para o ano completo e 12,9% e 9,5% para a época úmida, respectivamente.

4.3.4 C-2 vs. C-3

Para determinar se a mudança do uso e ocupação do solo apresenta influência significativa na disponibilidade hídrica na BHRC, perante o clima futuro estimado nos RCPs, foram comparados os resultados de ET e vazão média mensal do C-2 (S.A. e mudança climática) com os do C-3 (S.F. com mudança climática). Os valores obtidos por esta comparação, para a ET, são expostos no Apêndice G, enquanto os resultados referentes à vazão são apresentados no Apêndice H. As Tabelas 35 e 36, trazem, respectivamente, a avaliação da significância, pelo teste t de Student, da comparação dos valores de ET e vazão entre o C-2 e o C-3.

Tabela 34 – Teste t de Student - Evapotranspiração C-2 vs. C-3 (p-valor)

Evapotranspiração Média Mensal Estimada S.A. vs. S.F.				
Cenário	Ano Completo	Época Úmida	Época Seca	
RCP 2.6_1ª Met._S.F. < RCP 2.6_1ª Met._S.A.	1.13E-04	6.38E-04	2.47E-02	
RCP 2.6_2ª Met._S.F. < RCP 2.6_2ª Met._S.A.	1.38E-04	1.19E-03	1.59E-02	
RCP 2.6_Total_S.F. < RCP 2.6_Total_S.A.	1.23E-04	8.75E-04	1.98E-02	
RCP 4.5_1ª Met._S.F. < RCP 4.5_1ª Met._S.A.	1.16E-04	5.76E-04	2.71E-02	
RCP 4.5_2ª Met._S.F. < RCP 4.5_2ª Met._S.A.	9.49E-05	1.15E-03	1.16E-02	
RCP 4.5_Total_S.F. < RCP 4.5_Total_S.A.	1.01E-04	8.16E-04	1.74E-02	
RCP 6.0_1ª Met._S.F. < RCP 6.0_1ª Met._S.A.	1.51E-04	8.55E-04	2.51E-02	
RCP 6.0_2ª Met._S.F. < RCP 6.0_2ª Met._S.A.	1.30E-04	1.31E-03	1.38E-02	
RCP 6.0_Total_S.F. < RCP 6.0_Total_S.A.	1.37E-04	1.05E-03	1.83E-02	
RCP 8.5_1ª Met. S.F. < RCP 8.5_1ª Met. S.A.	1.33E-04	3.08E-04	4.41E-02	
RCP 8.5_2ª Met._S.F. < RCP 8.5_2ª Met._S.A.	2.14E-04	1.82E-03	6.75E-03	
RCP 8.5_Total_S.F. < RCP 8.5_Total_S.A.	1.49E-04	8.13E-04	1.95E-02	

Fonte: O Autor.

A análise de C-1, cenário de mudança de uso e ocupação utilizando os dados climáticos observados, indica que não há variação significativa para a ET entre S.A. e S.F. em nenhum dos cenários proposto e, para a vazão, apenas o período da época seca se mostra significativo. Entretanto, no C-3, observa-se outro comportamento.

Tanto a ET quanto a vazão se mostram com valores estatisticamente diferentes com a mudança de S.A. para S.F., em todos os cenários RCP e suas subdivisões.

A variação média, de C-2 para C-3, do período simulado como um todo é de 2,5% a 2,9% de aumento na vazão e de 2,3 a 2,4% de redução da ET. Este comportamento é o esperado, visto que a alteração do uso e ocupação consistiu, basicamente, na mudança de áreas de floresta para agricultura. Ou seja, houve a troca de uma ocupação com características de alta retenção d'água (interceptação, infiltração etc.) para outra com menor índice de retenção (menor interceptação, solo mais compacto).

Tabela 35 – Teste t de Student - Vazão C-2 vs. C-3 (p-valor)

Vazão Média Mensal Estimada S.A. vs. S.F.				
Cenário	Ano Completo	Época Úmida	Época Seca	
RCP 2.6_1ª Met._S.F. > RCP 2.6_1ª Met._S.A.	1.35E-04	9.20E-05	1.97E-02	
RCP 2.6_2ª Met._S.F. > RCP 2.6_2ª Met._S.A.	1.74E-04	8.47E-05	2.43E-02	
RCP 2.6_Total_S.F. > RCP 2.6_Total_S.A.	1.52E-04	8.59E-05	2.18E-02	
RCP 4.5_1ª Met._S.F. > RCP 4.5_1ª Met._S.A.	1.53E-04	6.44E-05	2.90E-02	
RCP 4.5_2ª Met._S.F. > RCP 4.5_2ª Met._S.A.	1.27E-04	9.92E-05	1.75E-02	
RCP 4.5_Total_S.F. > RCP 4.5_Total_S.A.	1.34E-04	7.75E-05	2.03E-02	
RCP 6.0_1ª Met._S.F. > RCP 6.0_1ª Met._S.A.	9.63E-05	5.47E-05	2.15E-02	
RCP 6.0_2ª Met._S.F. > RCP 6.0_2ª Met._S.A.	1.34E-04	2.49E-04	1.81E-02	
RCP 6.0_Total_S.F. > RCP 6.0_Total_S.A.	1.07E-04	1.15E-04	1.86E-02	
RCP 8.5_1ª Met. S.F. > RCP 8.5_1ª Met. S.A.	1.64E-04	1.10E-04	1.70E-02	
RCP 8.5_2ª Met._S.F. > RCP 8.5_2ª Met._S.A.	3.02E-04	2.35E-04	2.58E-02	
RCP 8.5_Total_S.F. > RCP 8.5_Total_S.A.	2.17E-04	1.61E-04	1.79E-02	

Fonte: O Autor.

A Tabela 69 do Apêndice I apresenta os principais resultados obtidos no item 4.3. Enquanto os arquivos gerados na simulação estão disponibilizados no link: https://drive.google.com/drive/folders/1Jr_aJB8XxmvjiojO2mb9eaK0XxrIOLUy?usp=s_haring.

4.4 DEMANDA DE ÁGUA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA

O item 4.3 apresenta os resultados das simulações geradas, entretanto, para avaliar a gestão dos recursos hídricos na BHRC ainda é necessário observar as condições atuais. Quanto às outorgas emitidas, como apresentado no item 3.2.5, 95,31% das outorgas d'água da BHRC obtidas são para uso industrial (SANTA

CATARINA, 2008a). Ao considerar a contribuição do setor industrial, de 25,91%, no PIB de Joinville (R\$ 30.785.682.000,00) em 2018 (IBGE, 2021b), tem-se que a relação de produção de bens dentro da bacia, por m³/s, é de R\$ 3.758.017.000,33.

Porém, a vazão outorgada total da BHRC é de 2,023 m³/s (SANTA CATARINA, 2008a) dos 2,201 m³/s outorgáveis (valor referente à Foz do Rio Cubatão) (SILVA, 2019). Assim, apenas 0,178 m³/s estão disponíveis para outorga. Com um crescimento populacional de 1,58 a.a. e crescimento médio do PIB de 1,08%, para os últimos 10 anos, observa-se que a BHRC não será capaz de fornecer água para o desenvolvimento futuro da cidade.

5 DISCUSSÃO

5.1 ESCOLHA DO GCM

De todas as opções de GCMs disponíveis, o GCM4 se mostrou o mais fiel à realidade local pelo método de correlação de Pearson. Esta correlação procurou comparar o comportamento da precipitação de cada GCM com o comportamento histórico observado. Todos os GCMs apresentaram resultados pouco satisfatórios, com coeficiente de correlação variando de 0,16 a 0,40. Apesar de não demonstrar grande correlação, o GCM4 foi tido como o melhor para a região, pois seus coeficientes de correlação se mostraram os mais elevados (0,27-0,38) dentre os GCMs avaliados, quando consideradas as precipitações dos quatro cenários RCPs.

Os baixos valores da correlação de Pearson obtidos indicam que o comportamento da precipitação média mensal do GCM4 com a precipitação média mensal da série observada apresenta distinções entre si. A maior variação foi registrada para os meses de novembro e março, ambos com valores estimados de 40 a 55% menores que as médias observadas para o mês.

Um dos motivos para esta diferença pode estar na localização das estações, virtuais e real, utilizadas. A estação de Pirabeiraba, utilizada como fonte de dados reais, possui valores de precipitação referentes à planície da BHRC, sob o efeito da orografia do local. Entretanto, as estações virtuais, localizadas na planície e planalto, não demonstram ter boa representação do efeito orográfico.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO

Durante a análise de sensibilidade pelo método de Sobol os parâmetros que se mostraram significativos apresentam influência semelhantes no modelo, redução da presença de água na camada superficial do solo (primeiros 10 cm). O coeficiente de movimentação da água subterrânea (revap_co) foi calibrado de modo a restringir a movimentação da água do aquífero raso para a superfície. A profundidade das camadas (z) sofreu aumento, permitindo maior infiltração e percolação. Entretanto, o parâmetro awc, de capacidade de armazenamento de água no solo foi reduzido, assim, o solo foi considerado mais profundo (maior armazenamento de água), mas com menor capacidade de armazenamento por unidade de volume. O parâmetro

epco, referente à absorção de água pela vegetação, foi calibrado de modo a reduzir a absorção de água das camadas profundas do solo. E, finalizando, o Número de Curva (CN2) foi calibrado de modo a ter seu valor aumentado, acarretando maior escoamento superficial (ARNOLD *et al.*, 2012).

Com essa característica de reduzir a água próximo à superfície do solo, o modelo gera maior infiltração e percolação, menor ET e maior amplitude do escoamento superficial (ABBASPOUR *et al.*, 2015; SCHWAMBACK; RIGO, 2015). Esse comportamento é o esperado devido às informações de entrada fornecidas ao SWAT+. O aumento do valor de CN2 é justificado através da inclinação presente na seção da BHRC utilizada, em que foi observado que apenas 9,89% da área apresenta inclinação de 5% ou menor, percentual utilizado na determinação do valor original do CN2 (CONSERVATION ENGINEERING DIVISION, 1986). Cerca de 85% da área mostra inclinação superior a 20% (CCJ, 2017). Similarmente, as características da cobertura “floresta” inicialmente fornecida ao modelo podem diferir, levemente, das reais, visto que a escolha das classes de uso e ocupação utilizadas foram àqueles presentes no banco de dados do SWAT com a descrição mais próxima às reais. Assim, é possível que, devido a variedade das espécies vegetais dentro de cada classe, algumas das características sejam diferentes. Além do mais, as informações do solo podem ser imprecisas devido à baixa resolução e número de sondagens para o mapa utilizado (SEPUD, 2020; UBERTI, 2011; POTTER *et al.*, 2004; CCJ, 2017).

Após a calibração duas das três estatísticas de precisão utilizadas apontam resultados de satisfatórios a bons ($R^2 = 0,71$ e $0,61$ e $P_{bias} = 14,4$ e $2,6$, calibração e validação, respectivamente). Apenas o NSE ($0,38$ e $0,32$, para calibração e validação, respectivamente) se mostrou abaixo do recomendado pela bibliografia (MORIASI *et al.*, 2007), ou seja, indica que o comportamento da vazão gerada no SWAT+ difere do comportamento da vazão observada no Rio Cubatão perante as mesmas condições climáticas. Um resultado baixo de NSE já era esperado devido à qualidade e quantidade de dados de entrada (ABBASPOUR, 2022; TAN; YANG, 2020).

Apenas uma estação (cod. 2648033), com série histórica de precipitação suficientemente longa, pôde ser utilizada no presente estudo. A localização desta estação é na região de planície da BHRC, acarretando leituras mais elevadas de precipitação (OLIVEIRA *et al.*, 2017) do que as estações virtuais 262128, 262129, 263128 e 263129, consideradas distribuídas entre o planalto e a planície (Figura 18). Dentro da BHRC, a montante do ponto avaliado, há apenas uma outra estação (código

2649060) que possui com falhas e não possui dados de temperatura, localizada no planalto. Caso tivesse sido possível a utilização desta estação os dados médios de chuva seriam menores, o que talvez levaria a maiores valores de NSE. Esse comportamento de chuvas dentro da BHRC, gerados pela cobertura vegetal e efeito orográfico da Serra do Mar, e umidade oceânica (MELLO; OLIVEIRA *et al.*, 2016), faz com que esta área seja particular do ponto de vista hidrológico. Esse comportamento não foi identificado na malha 0,5°x0,5°. Todas as estações virtuais disponíveis localizavam-se fora desta área. Com relação aos dados de temperatura, há poucos dados e em séries históricas fragmentadas.

Para a única estação com série histórica de vazões do Rio Cubatão o problema é a confiabilidade dos dados. A jusante da régua linimétrica utilizada para leitura do nível d'água está localizada a captação de água para o abastecimento público. Em épocas de baixas vazões a empresa de saneamento altera livremente, e sem registros, um enrocamento existente para aumentar a lâmina d'água e permitir a adução. Essa alteração gera valores de vazão incorretos, pois o método de determinação da vazão é por curva de descarga. A informação sobre a execução destas alterações não é registrada pela empresa de saneamento e nem repassada aos responsáveis pela inserção dos dados no HIDROWEB. Assim, é possível que diversas leituras de baixa vazão da série histórica estejam superestimadas. Ou seja, as obras da companhia de saneamento no enrocamento do Rio Cubatão tiveram impacto direto na precisão do modelo.

5.3 EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

5.3.1 Precipitação

Há diferença na precipitação e temperatura entre os valores observados e os valores estimados do GCM4. Em parte, essa diferença se dá pela quantidade e localização das estações utilizadas para entrada de dados no SWAT+ (TAN; YANG, 2020), observa-se que os valores estimados apresentam baixa correlação com os observados no período de 01 de setembro 2008 a 31 de agosto de 2018.

A inserção destas informações no SWAT+ se deu utilizando quatro estações virtuais, para o GCM4, e uma estação real, para a série histórica. Essa diferença em quantidade e posição entre as estações virtuais e real foi crucial para a diferença na

precipitação. Como já foi comentado no item 5.2, a estação real está localizada na planície, região de alta precipitação, enquanto as estações virtuais foram consideradas tanto na planície, quanto na serra e no planalto. O SWAT utiliza a estação mais próxima de cada sub-bacia como fonte de dados para a precipitação, assim, tendo apenas uma estação real, a precipitação registrada por esta foi utilizada em toda área de estudo (NEITSCH *et al.*, 2011). Isto significa que foi considerada a precipitação na região de planalto como idêntica à da planície, algo que não condiz com a realidade (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Entretanto, esta situação não pôde ser evitada, pois não há registros históricos suficientes de estações meteorológicas reais para o planalto. Esta insuficiência de informações é tida como um dos maiores limitantes deste trabalho.

5.3.2 Temperatura

Quanto à temperatura, mesmo as estações virtuais sendo consideradas em cotas mais elevadas, estas apresentam estimativas de temperatura médias mensais maiores, entre 1,1 °C a 2,7 °C, em relação aos valores observados para o ano hidrológico completo. E, como a temperatura é um dos maiores influenciadores na ET, sua influência tem impacto direto na ET estimada ser mais elevada. De modo geral as maiores diferenças entre a temperatura média mensal observada e a estimada ocorrem na época seca do ano (7,0% a 12,3%).

5.3.3 Evapotranspiração

Ao avaliar a ET, a maior diferença entre a ET média mensal estimada com base nos dados observados com aquela gerada com base no GCM4 se dá na época úmida. Para este cenário a ET média mensal estimada com os dados climáticos MIROC é de 9,3% a 13,4% maior que o estimado para os dados climáticos observados. Esse comportamento pode ser explicado em função das considerações feitas pelo SWAT+, em que o volume evaporado depende diretamente a quantidade de água presente em cada camada do solo (NEITSCH *et al.*, 2011). Como na época seca há menos água, mesmo com maior aumento da temperatura, estima-se que o aumento na ET da época seca seja menor que o aumento da época úmida, pois o

software limita a evaporação quando há pouca água disponível, priorizando o uso da mesma pela vegetação (NEITSCH *et al.*, 2011).

5.3.4 Vazão

A vazão gerada pelo SWAT+, para o período de 2008-2018, baseada no MIROC, quando comparada aos valores observados no mesmo período, estima valores de vazão de 50% a 60% menores para o clima dos cenários RCPs. A estimativa da vazão é ainda menor para a época seca (55 – 70%). Este resultado se deve aos fatores mencionados anteriormente, que reduzem o escoamento superficial: há uma menor precipitação média mensal (18,5 – 25,7%) para os cenários RCPs, maior temperatura média mensal (5,2 – 12,2%), maior ET média mensal (8,3 – 11,6%) e os valores superestimados da vazão média mensal observada, devido às obras da companhia de abastecimento.

Entretanto, a vazão média mensal estimada nos períodos de 2019-2059 e 2059-2099, com o uso e ocupação do solo atual, mostra crescimento em alguns cenários: RCP 6,0 (11,3%) e (13,0%) e RCP 8,5 (12,1%) e (9,5%), respectivamente ano hidrológico completo e época úmida. Os demais cenários mostram não haver mudança significativa na vazão. Ao comparar este resultado com a estimativa de variação da ET para o mesmo período, observa-se que a ET deve permanecer constante (salvo no RCP 6,0 de ano hidrológico completo que apresenta queda de 1,8% e o RCP 8,5 de época úmida com crescimento de 4,6%), ou seja, o aumento da vazão se deve, em grande parte, ao aumento da precipitação.

Este aumento na vazão estimada é comparável ao obtido por Li e Fang (2021) para 2020-2093, em seu estudo disponibilidade hídrica da bacia do Rio Mun, na Tailândia, entretanto, os autores mostram uma redução seguido de crescimento, em seu estudo. Outras diferenças entre os trabalhos é a não utilização do RCP 6,0 por Li e Fang (2021), e todos os RCPs apresentarem crescimento estatisticamente significativo da vazão.

No presente trabalho observou-se que, para cada 1% de aumento na precipitação houve um aumento na vazão, entre a 1ª e 2ª metade da simulação do RCP 6,0 de 2,3%, considerando o ano hidrológico completo. Para o RCP 8,5 este aumento foi de 1,7%, novamente considerando o ano completo. Resultados similares

aos observados por Li e Fang (2021) de 2,28%, para o RCP 4,5 e 2,34% para o RCP 8,5.

5.4 EFEITO DA MUDANÇA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para os cenários de mudança de uso e ocupação do solo sem mudança climática (C-1) e com mudança climática (C-3), foi considerado um aumento das áreas de agricultura e solo exposto de 10,74% e 2,41%, respectivamente, enquanto as áreas de vegetação natural foram reduzidas em 12,04%. Para o C-1, não houve variação estatisticamente significativa na ET média mensal, porém observou-se que a vazão média mensal da época seca apresentou aumento de 4,4%, ou 0,44 m³/s, enquanto na época úmida e no ano hidrológico completo não houve mudança significativa. Este comportamento pode ser explicado pelo maior consumo de água pela vegetação em temperaturas mais elevadas (época úmida) considerado pelo SWAT+ (NEITSCH *et al.*, 2011).

O cenário C-3 apresenta o mesmo comportamento, observado em C-2 (discutido em 5.3), entre a 1ª e 2ª metade da simulação. Entretanto, para o C-3 a queda na ET média mensal do ano completo no RCP 6,0 é de 1,6%, enquanto o aumento da ET média mensal da época úmida no RCP 8,5 é de 4,6%. Novamente como no C-2, há um aumento na vazão média mensal do C-3 para os RCPs 6,0 e 8,5, tanto para o ano completo quanto para a época úmida. No caso do RCP 6,0, este aumento é de 11,2%, para o ano completo, e 12,9% para a época úmida, enquanto para o RCP 8,5 este crescimento é de 12,1% e 9,5%, respectivamente.

Comparando esse crescimento com a variação da precipitação média mensal, têm-se os mesmos resultados obtidos para C-2. Para cada 1% de aumento na precipitação média mensal, houve um aumento na vazão média mensal entre a 1ª e 2ª metade da simulação do RCP 6,0, de 2,3% e 2,2%, respectivamente, ano completo e época úmida, enquanto o RCP 8,5 mostra aumento de 1,7% e 1,5%, respectivamente.

Como mencionado acima, ao avaliar o efeito da mudança do uso e ocupação do solo no C-1, foi observado que apenas a vazão média mensal da época seca apresenta variação estatisticamente significativa. Entretanto, ao comparar os resultados de C-3 com os valores obtidos em C-2, que avalia a influência da alteração do uso e ocupação do solo para o período simulado futuro, todos os casos apresentam

variação significativa de ET e vazões médias mensais. Observa-se que em todos os casos avaliados a ET média mensal é estatisticamente menor quando considerado o S.F. em relação ao S.A, variando de -1,8% a -2,6%. De modo similar, a vazão média mensal estimada é maior com S.F. em relação ao S.A. em todos os casos entre 1,4% e 3,4%. Gomes *et al.* (2021) obtiveram resultados similares de redução da ET (-0,9% a -3,3%) e aumento da vazão (6,0% a 15,0%) em seu estudo na Bacia Hidrográfica do Muriaé, entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, Brasil. Os valores apresentados pelos autores são referentes à alteração de uso e ocupação descrita por eles como “Combustível Fóssil”, um cenário em que a área de estudo considerada tem troca de 18% da área de floresta para pastagens e cultivo de café.

A alteração da cobertura vegetal, de maior índice de interceptação, infiltração, armazenamento e transpiração, para uma cobertura de produção agrícola/solo exposto, que têm tendência de apresentar maior compactação do solo, menor infiltração e retenção d’água, gera vazões mais intensas (VEIGA; GUANDIQUE; NARDORDOCCI, 2019). Provavelmente, este é o motivo gerador da tendência de maiores vazões e menor ET no presente estudo.

5.5 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A BHRC é uma bacia de domínio estadual, e assim a gestão de suas águas está sujeita à Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 1994). Nesta política o único instrumento previsto é a outorga de direito de uso de água. Esta, porém, não é a única legislação sobre o assunto. Várias outras portarias são editadas pela Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado, competente para este assunto. Desta forma, existe uma vasta quantidade de documentos. Entretanto a o grande número de documentos sobre o assunto têm gerado problemas para a gestão dos recursos hídricos devido às inúmeras incompatibilidades entre si. Diferentes legislações sobre os usos de água da bacia também apresentam contradições entre si, como é o exemplo das Portarias nº 38 e nº 51. A primeira estabelece que a vazão de referência para a outorga é a Q_{95} na BHRC, sem indicar qual percentual desta pode ser outorgado. Já Portaria nº 51 estabelece que o limite de outorga no Estado de Santa Catarina deve ser baseado na Q_{98} e estabelece que 50% da Q_{98} em cada seção pode ser outorgada (SANTA CATARINA, 2006; SANTA CATARINA, 2008b). Todo o processo de outorga é auto

declaratório, sem meios para verificar a veracidade dos valores, nem sistemas de informação em tempo real.

O Estado conta com um Sistema de Informação em Recursos Hídricos, porém não é possível acessar os dados de outorga emitidos, e não há um sistema de monitoramento online da vazão, isso dificulta a transparência e o acompanhamento pela sociedade. Além disso, os dados, quando oficialmente solicitados e fornecidos pelo Estado, são desconstruídos e impedem seu uso. O Comitê de Gerenciamento das Bacias Hidrográficas do Complexo Hidrológico da Baía da Babitonga e Bacias Contíguas (CHBB), do qual faz parte a BHRC, não tem acesso direto aos dados de outorga.

Para a gestão dos recursos hídricos é necessária a união de instrumentos públicos de gestão e dados confiáveis para a correta tomada de decisão. Como pode ser observado, a gestão dos recursos hídricos da BHRC enfrenta entraves administrativos. Há necessidade de melhorias no modelo de gestão das águas. Não deixando de lado a atualização/inclusão de instrumentos para a gestão. A implementação em nível estadual e ao nível da bacia hidrográfica dos instrumentos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), quando cabível, pode ser visto como um primeiro passo. Dentre estes a cobrança pelo uso dos recursos, a compensação aos municípios e um sistema de Informação (atualizado, eficiente e transparente). De acordo com Veiga e Magrini (2013) é necessário que haja uma coordenação mais eficiente entre as diversas esferas governamentais. Chipofya, Kainja e Bota (2009) complementam que é preciso a coordenação e cooperação de todas as parcelas da sociedade, incluindo os setores governamentais, organizações governamentais e não-governamentais, instituições privadas, instituições de ensino e da sociedade civil para atingir o uso sustentável dos recursos hídricos.

Do ponto de vista técnico, a falta de equipamentos e monitoramento na BHRC, em diversas seções do Rio, é preocupante. É necessário conhecer as características da região, especialmente pela sua importância econômica, para garantir a sustentabilidade no uso de seus recursos. Para tal, a instalação de novas estações de medição e manutenção das existentes precisam ser vistas como prioridade. Atualmente, o número de séries históricas de dados como precipitação é extremamente baixo e repleto de falhas, o que dificulta a gestão do recurso. O mesmo pode-se dizer para a medição da temperatura e vazão. Outros valores com potencial

para auxiliar na gestão dos recursos hídricos como a velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa são inexistentes ou insuficientes para a região e necessários para um cálculo mais preciso da evapotranspiração e, consequentemente, do balanço hídrico.

No que se refere às características da região, é necessário efetuar, e manter atualizado, o cadastro de usuários, grandes e pequenos, que fazem uso da água da bacia. A fiscalização de usuários não cadastrados também deve ser incentivada.

Por fim, a ocupação irregular que ocorre na região pode gerar redução da qualidade da água do Rio Cubatão pela falta de saneamento. Efeito intensificado na época seca, com a redução do volume de água, acarretando maior concentração de poluentes. Com a alteração do uso e ocupação do solo prevista e utilizada neste trabalho, é possível que um feito similar de redução da qualidade da água seja observado. Apesar de não ter sido avaliada a qualidade da água neste estudo, Zarrineh, Abbaspour e Holzkämper (2020) preveem o aumento da concentração de nutrientes na água, em um estudo similar na Suíça, que prevê a redução da vazão na época seca.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho, sobre a disponibilidade hídrica para a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão utilizando a modelagem SWAT procurou expor estimativas sobre o que poderá ocorrer na BHRC com ocupação de sua área, prevista em lei, somado às possíveis mudanças climáticas. E através desta previsão fornecer possíveis sugestões na melhoria do processo de gestão hídrica na bacia.

Para o estudo foi utilizado o *software* SWAT+ na criação do modelo hidrológico, posteriormente calibrado e validado pelo *software* SWATPlus Toolbox, utilizando o método *Dynamically Dimensioned Search* (DDS). A precisão do modelo gerado pôde ser considerada satisfatória, apesar de uma das três estatísticas de precisão apresentar valores abaixo do recomendado pela bibliografia. Isto se deve, provavelmente, pois os dados de entrada inseridos no modelo apresentam limitações ou falhas.

A série histórica de precipitação apresentou falhas em diversos períodos. Quanto à temperatura, foi necessário utilizar a série de uma estação localizada a 11,5 km da estação de precipitação, essa, também, com dados faltantes. Em ambos os casos as falhas de medição foram sanadas, quando possível, utilizando regressão linear com estações da região. Como não foi possível utilizar mais de uma estação na modelagem da série histórica no SWAT, pois não existem mais estações com série de dados suficientemente longa/completa na região, a qualidade das informações de entrada foi prejudicada, pois foram consideradas as mesmas precipitações e temperaturas na região de planalto e planície da bacia.

O mesmo problema foi encontrado para a série histórica de vazão que apresentou dados faltantes na medição, falhas novamente sanadas por meio de regressão linear com uma estação a 8,7 km de distância. Os valores da vazão, além disso, se mostraram duvidosos, pois obras por parte da companhia de abastecimento público, alteraram a cota d'água utilizada na única seção de medição de vazão, especialmente em períodos de baixas vazões. E, como não há registro de quando estas obras foram realizadas, não foi possível identificar as leituras errôneas, novamente reduzindo a qualidade dos dados de entrada.

Dos cinco modelos climáticos futuros analisados, apenas os valores do modelo MIROC-ESM-CHEM (GCM4) foram utilizados, visto que este é o GCM em que o comportamento da precipitação de cada RCP é o mais próximo ao observado na

região. Para os cenários de simulação do clima futuro, com e sem alteração do uso e ocupação do solo, as informações do GCM4 foram divididas em duas metades, o que permitiu avaliar a tendência de evolução de cada RCP.

A avaliação da mudança de uso e ocupação do solo mostrou que para o clima da série histórica (C-1), não há mudança estatisticamente significativa de ET e vazão, exceto a vazão da época seca mostra aumento. Entretanto, quando a mudança de uso e ocupação do solo foi avaliada junto às alterações climáticas (C-3), foi observado que o S.F. apresenta menor ET e maior vazão em todos os cenários. Comportamento esperado de uma mudança de cobertura vegetal para produção agrícola.

Ao considerar apenas as mudanças climáticas, observou-se um aumento da precipitação, da 1ª para a 2ª metade da simulação, apenas para a época úmida do RCP 6,0 e em todos os cenários do RCP 8,5. Os demais RCPs não apresentaram mudança significativa. Em todos os casos a precipitação estimada pelos RCPs do GCM4 é inferior aos valores observados.

Quanto à temperatura, apenas o RCP 2,6 não estima aumento durante a simulação. Esperava-se observar aumento na ET, devido ao aumento na temperatura, entretanto apenas a época úmida do RCP 8,5 apresenta esse comportamento, enquanto a avaliação de ano completo do RCP 6,0 mostra queda na ET.

A partir destas tendências de precipitação, temperatura, ET, obteve-se que a vazão estimada futura se mantém estatisticamente igual para os RCPs 2,6 e 4,5, enquanto os RCPs 6,0 e 8,5 mostram aumento. Este comportamento indica que, para a região, o aumento dos gases do efeito estufa, deve causar aumento na da vazão do Rio Cubatão.

Mesmo com a expectativa de aumento da vazão, e possibilidade de captação, é preciso considerar o aumento populacional e de consumo futuros. Pelos resultados obtidos neste estudo, a vazão outorgável e a vazão já outorgada já estão muito próximas. Considerando o crescimento populacional e econômico de Joinville, a falta d'água representa um problema sério para a região.

Foi observado, ainda, que a gestão dos recursos hídricos apresenta dificuldades no que diz respeito à transparência dos dados. O único instrumento de gestão existente é a outorga, o que limita, em muito, as ações necessárias para a gestão do recurso hídrico.

O presente estudo, aponta uma estimativa da disponibilidade hídrica futura, considerando a vazão média, e pode servir como base para a tomada decisões a

respeito da gestão hídrica da BHRC. São apontados diversos problemas técnicos e administrativos que dificultam a gestão dos recursos hídricos na bacia. Problemas estes, que podem limitar o desenvolvimento de Joinville num futuro próximo por redução na disponibilidade de água. Finalizando, sugestões foram apresentadas visando melhorar o processo de gestão e a governança das águas da bacia.

REFERÊNCIAS

2w2e – Water Weather Energy Ecosystem. **Climate Change Data formatted for immediate use in SWAT and SWAT+**. Products, Global IPCC Climate Data. Disponível em: <https://www.2w2e.com/home/CIMP>. Acesso em: 25 mar. 2021.

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – A user Manual**. Dübendorf, Suíça: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology – Eawag, 2015. Disponível em: https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf. Acesso em: 14 set. 2020.

ABBASPOUR, K. C. The Fallacy in the Use of the “Best-Fit” Solution in Hydrologic Modeling. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 802, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721047884?dgcid=author>. Acesso em: 27 ago. 2021.

ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; SRINIVASAN, R. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. **Water**, [s. l.], v. 10, n. 6, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/1/6/htm>. Acesso em: 15 set. 2021.

ABBASPOUR, K. C. SWATCUP "How to do" (5): Validation. Youtube, 17 jun. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=7E9qxRzwmV4>. Acesso em: 17 ago. 2021.

ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; YANG, H.; SRINIVASAN, R. Global Soil, Landuse, Evapotranspiration, Historical and Future Weather Databases for SWAT Applications. **Scientific Data**, [s. l.], v. 6, n. 263, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0282-4>. Acesso em: 16 mar. 2021.

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and Uncertainty of a High-Resolution Large-Scale SWAT Model. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 524, p. 733-752, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415001985?via%3Dihub>. Acesso em: 08 mar. 2021.

ÁGUAS DE JOINVILLE. **Relatório de Sustentabilidade 2019**. Joinville: 2020. Disponível em: https://www.aguasdejoinville.com.br/wp-content/uploads/2020/06/Relatorio_de_Sustentabilidade_2019.pdf. Acesso em: 22 set. 2019.

AJMAL, M.; WASEEM, M. WI, S.; KIM, T. Evolution of a Parsimonious Rainfall–Runoff Model Using Soil Moisture Proxies. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 530, p. 623-633, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0022169415007787>. Acesso em: 24 mar. 2021.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil. Acesso em: 20 jun. 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA. **Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos**: Caderno de Capacitação em Recursos Hídricos. Brasília: Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2011. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/OutorgaDeDireitoDeUsoDeRecursosHidricos.pdf>. Acesso em: 22 set. 2020.

_____. **HidroWEB**: Séries Históricas de Estações. Brasília, 2021. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 17 ago. 2021.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 19, p. 563-572, 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/hyp.5611>. Acesso em: 08 jul. 2020.

ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/90102/azdezas.pdf>. Acesso em: 16 set. 2020.

ARNOLD, J. G. *et al.*; 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**, [s. l.], v. 34, 1998. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>. Acesso em: 08 jul. 2020.

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; NICKS, A. D.; SAMMONS, N. B. **SWERRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management**. Temple, Texas: Texas A&M University, 1990.

BACK, A. J.; OLIVEIRA, J. L. L.; HENN, A. Relações entre Precipitações Intensas de Diferentes Durações para Desagregação da Chuva Diária em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 391-398, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v16n4/v16n04a09.pdf>. Acesso em: 20 de jan. de 2021.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do Modelo de Simulação SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MG**. 2005. 132 f. Dissertação (Mestre em Física e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente da Universidade Federal do Mato Grosso – UFMG, Cuiabá, 2005.

BEHRANGI, A. *et al.* Comment On “Dynamically Dimensioned Search Algorithm for Computationally Efficient Watershed Model Calibration” By Bryan A. Tolson and Christine A. Shoemaker. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 44, n. 12, 2008. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007WR006429>. Acesso em: 11 mar. 2021.

BETSEN, M. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation. **Geoscientific Model Development Discussions**, [s. l.], v. 5, p. 2843-2931, 2012. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/preprints/5/2843/2012/gmdd-5-2843-2012.pdf>. Acesso em: 26 maio 2021.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 30 set. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**: Brasília, Distrito Federal, 1997.

BRESSIANI, D. de A. *et al.* Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Applications in Brazil: Challenges and Prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 1-27, 2015. Disponível em: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765/0>. Acesso em: 01 out. 2020.

BRIONES, R. U.; ELLA, V. B.; BANTAYAN, N. C. Hydrologic Impact Evaluation of Land Use and Land Cover Change in Palico Watershed, Batangas, Philippines Using the SWAT Model. **Journal of Environmental Science and Management**, v. 19, p. 96-107, 2016. Disponível em: <https://ovcre.uplb.edu.ph/journals-uplb/index.php/JESAM/article/download/159/141>. Acesso em: 05 nov. 2021.

CAMARA, A. C. F. C. Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB). 2003. 2019 f. Dissertação (Mestre em Engenharia)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRG. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1770/000357250.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 abr. 2021.

CCJ – COMITÊ CUBATÃO CACHOEIRA JOINVILLE. **Cartilha do Comitê da Bacia Hidrográfica do Cubatão do Norte**. Joinville, 2019. Disponível em: <https://www.cubataojoinville.org.br/restrito/img/arquivos/cartilha-do-comite-da-bacia-hidrografica-do-rio-cubatao-norte-1331585596253.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2020.

_____. Recursos Hídricos: WebGis. **Bacias Hidrográficas.shp**. Joinville: 2018a. Disponível em: <https://www.cubataojoinville.org.br/pagina/recursos-hidricos/webgis>. Acesso em: 09 jul. 2020.

_____. Recursos Hídricos: WebGis. **Hidrografia.shp**. Joinville: 2018b. <https://www.cubataojoinville.org.br/pagina/recursos-hidricos/webgis>. Acesso em: 09 jul. 2020.

_____. Recursos Hídricos: WebGis. **Pedologia.shp**. Joinville: 2017. <https://www.cubataojoinville.org.br/pagina/recursos-hidricos/webgis>. Acesso em: 02 set. 2021.

CECH, T. V. Principles of Water Resources: History, Development, Management, and Policy. 4 ed. Hoboken: Wiley & Sons. Inc, 2018.

CHIPOFYA, V.; KAINJA, S.; BOTA, S. Policy Harmonization and Collaboration Amongst Institutions – A Strategy Towards Sustainable Development, Management and Utilization of Water Resources: Case of Malawi. **Desalination**, [s. l.], v. 248, n. 1-3, p. 678-683, 2009. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S001191640900650X>. Acesso em: 07 out. 2021.

CHOW, V. te; MAIDMENT, D. R.; WAYS, L. W. **Applied Hydrology**. Nova York: McGRAW-Hill, 1988.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre, 2013.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.

COLLINS, W. J. *et al.* Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development Discussions**, [s. l.], v. 4, p. 997-1062, 2011. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/preprints/4/997/2011/gmdd-4-997-2011.pdf>. Acesso em: 24 maio 2021.

CONSERVATION ENGINEERING DIVISION. **Urban hydrology for Small Watersheds**. United States Department of Agriculture, Technical Release 55. Disponível em: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf. Acesso em: 08 set. 2020.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Atlas Pluviométrico do Brasil: Equações Intencidade-Duração-Frequência**. Porto Alegre: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/17514/idf_joinville_sc_suscet.pdf?sequence=1. Acesso em: 21 set. 2020.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: UNICAMP, 1992. Disponível em: https://www.academia.edu/34875703/Livro_Alvaro. Acesso em: 13 jul. 2020.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise Temporal do Uso do Solo e Comparação Entre os Índices de Vegetação NDVI e SAVI no Município de Santa Cruz do Rio Pardo/SP Usando Imagens Landsat 5. **RAEGA**, Curitiba, v. 21, p. 234-271, 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/17416/14028>. Acesso em: 13 jul. 2020.

DILE, Y.; SRINIVASAN, R.; GEORGE, C. **QGIS Interface for SWAT (QSWAT)**. Temple, Texas: Texas A&M University, 2015. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/114676/qswat-manual.pdf>. Acesso em: 24 set. 2020.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. SIGMine: WebMap. **titulol_minerários.shp**. Brasília: 2015. Disponível em: <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>. Acesso em: 30 set. 2020.

DOSDOGRU, F.; KALIN, L.; WANG, R.; YEN, H. Potential impacts of land use/cover and climate changes on ecologically relevant flows. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 584, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0022169420301141?via%3Dihub>. Acesso em: 27 abr. 2021.

DRIVER, N. E.; TASKER, G. D.; Technics for Estimation of Storm-Runoff Loads, Volumes, and Selected Constituent Concentrations in Urban Watersheds in the United States. USGS, 1988. Disponível em: https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2363/pdf/wsp_2363.pdf. Acesso em: 17 set. 2020.

DUFRESNE, J. L. *et al.* Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. **Climate Dynamics**, [s. l.], v. 40, p. 2123-2165, 2013. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00382-012-1636-1>. Acesso em: 26 maio 2021.

DUNNE, J. D. *et al.* GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 25, n. 19, p. 6646-6665, 2012. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/25/19/jcli-d-11-00560.1.xml>. Acesso em: 24 maio 2021.

FATMA – FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA. **Atlas ambiental da região de Joinville**: Complexo hídrico da Baía da Babitonga. Coordenação de Joaquim L. Knie. Florianópolis: Fatma / GTZ, 2002. IN: Bacias Hidrográficas da Região de Joinville: Gestão e Dados (2017).

FONSECA, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. São José dos Campos-SP, INPE, 2000. Disponível em: <http://bibdigital.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/bibdigital@80/2006/04.07.15.50.13/doc/mirror.cgi>. Acesso em: 13 jul. 2020.

FREY, C. H.; MOKHTARI, A.; ZHENG, J. Recommended Practice Regarding Selection, Application, and Interpretation of Sensitivity Analysis Methods Applied to Food Safety Process Risk Models. U. S. Department of Agriculture – USDA. Washington, DC, 2004.

GARUVA. **Lei Complementar nº 0112 de 27 de dezembro de 2018**. Altera a Lei Complementar nº 92/2015, que dispõe sobre a aprovação do Plano Diretor do Município de Garuva e dá outras providências [2018]. Disponível em: https://www.camaragaruva.sc.gov.br/camara/proposicao/Lei-Complementar/2018/1/0/7954#lista_texto_proposicao. Acesso em: 30 set. 2020.

GOMES, L. C. *et al.* Disentangling the Historic and Future Impacts of Land Use Changes and Climate Variability on the Hydrology of a Mountain Region In Brazil. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 594, 125650, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0022169420311112?via%3Dihub>. Acesso em 15 jul. 2021.

GONÇALVES, M.L.; ZANOTELLI, C.T.; OLIVEIRA, F.A. **Diagnóstico e Prognóstico das Disponibilidades e Demandas Hídricas do Rio Cubatão do Norte – Joinville – Santa Catarina**. Joinville: UNIVILLE, 2006. Disponível em: <https://www.cubataojoinville.org.br/restrito/img/arquivos/livro-1--diagnostico-e-prognostico-das-disponibilidades-e-demandas-hidricas-do-rio-cubatao-do-norte--joinville--santa-catarina.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2020.

GRIBBIN, J. E. **Introduction to Hydraulics & Hydrology**: With Applications for Stormwater Management. 4 ed. Stamford: Cengage Learning, 2013.

GRIENSVEN, A. van; MEIXNER, T. Methods to Quantify and Identify the Sources of Uncertainty for River Basin Water Quality Models. **Water Science & Technology**, v. 53, p. 51-59, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/7245283_Methods_to_Quantify_and_Identify_the_Sources_of_Uncertainty_for_River_Basin_Water_Quality_Models. Acesso em: 15 set. 2020.

GUPTA, H. V. S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312016000100053#B025. Acesso em: 16 set. 2020.

HAMEL, P. *et al.* The value of hydrologic information for watershed management programs: The case of Camboriú, Brazil. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 705, p. 135871, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719358668?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jul. 2021.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, [s. l.], v. 1, p. 96-99, 1985. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=26773&CID=aeaj1985&v=1&i=2&T=1>. Acesso em: 10 jul. 2021.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning** Data Mining, Interference, and Prediction. 2 ed. Nova York: Springer, 2009.

HUANG, X. *et al.* Parameter Optimization of Distributed Hydrological Model with a Modified Dynamically Dimensioned Search Algorithm. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 52, p. 98-110, 2014. Disponível em: Parameter optimization of distributed hydrological model with a modified dynamically dimensioned search algorithm - ScienceDirect. Acesso em: 11 mar. 2021.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. **Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual**. Athens, Georgia: U.S. Environmental Protection Agency, 1988. Disponível em: <http://www.dynsystem.com/netstorm/docs/swmm4manuals.pdf>. Acesso em: 17 set. 2020.

_____. Base Cartográfica Nacional IBGE 2019 – Escala 1:250 mil. **Limites_v2017.shp**. 2019. Disponível em: <https://forest-gis.com/download-de-shapefiles/>. Acesso em: 20 set. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades: Garuva. Panorama. 2021b. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/garuva/panorama>. Acesso em: 08 out. 2021.

_____. IBGE Cidades: Joinville. Panorama. 2021a. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/panorama>. Acesso em: 08 out. 2021.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2017. Disponível em: <http://www.inpe.br/>. Acesso em: 13 jul. 2020.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1,5°C**. Geneva: IPCC, 2019a. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf. Acesso em: 22 set. 2020.

_____. **Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge/Nova York, Reino Unido/ EUA: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf. Acesso em: 28 abr. 2021.

_____. **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Geneva, Suíça: IPCC, 2019b. Disponível em: www.ipcc.ch/srocc/. Acesso em: 28 abr. 2021.

_____. **Summary for Policymakers**. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Paris: IPCC, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>. Acesso em: 28 abr. 2021.

ISSA, R. A. A. M. **Determinação Da Equação do Coeficiente de Desagregação das Chuvas da Cidade de Joinville/SC**. 2017. 46 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, Santa Catarina, 2017.

IVERSEN, T. *et al.* The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 2: Climate response and scenario projections. **Geoscientific Model Development**, [s. l.], v. 6, p. 389-415, 2013. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/6/389/2013/gmd-6-389-2013.pdf>. Acesso em: 26 maio 2021.

JACOBSON, C. Identification and Quantification of the Hydrological Impacts of Imperviousness in Urban Catchments: A Review. **Journal of Environment Management**, [s. l.], v. 96, n. 6, p. 1438-1448, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479711000259>. Acesso em: 10 jul. 2020.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente** - Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. 2ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 2009.

JEONG, J. *et al.* Development and Integration of Sub-Hourly Rainfall-Runoff Modeling Capability Within a Watershed Model. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 24, p. 4505-4527, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-010-9670-4>. Acesso em: 14 jul. 2020.

JHA, M. *et al.* Climate Change Sensitivity Assessment on Upper Mississippi River Basin Streamflows Using SWAT. **Journal of the American Water Resource Association**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 997-1015, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/227510792_Climate_Change_Sensitivity_Assessment_on_Upper_Mississippi_River_Basin_Streamflows_Using_SWAT. Acesso em: 25 set. 2020.

JIANG, Y.; ZEVENBERNGEN, C.; MA, Y. Urban Pluvial Flooding and Stormwater Management: A Contemporary Review of China's Challenges and "Sponge Cities" Strategy. **Environmental Science & Policy**, [s. l.], v. 80, p. 132-143, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901117306123>. Acesso em: 10 jul. 2020.

JOINVILLE. **Lei Complementar nº 470, de 09 de janeiro de 2017**. Redefine e institui, respectivamente, os Instrumentos de Controle Urbanístico - Estruturação e Ordenamento Territorial do Município de Joinville, partes integrantes do Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável do Município de Joinville e dá outras providências [2017]. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-de-zoneamento-uso-e-ocupacao-do-solo-joinville-sc#:~:text=1%C2%BA%20Esta%20Lei%20Complementar%20redefine,que%20visa%20promover%20a%20qualifica%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 21 set. 2020.

JOINVILLE. **Lei Complementar nº 523, de 04 de janeiro de 2019**. Regulamenta os Instrumentos de Promoção ao Desenvolvimento Sustentável previstos na Lei Complementar nº 261, de 28 de fevereiro de 2008 - Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Joinville. [2019]. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sc/j/joinville/lei-complementar/2019/52/523/lei-complementar-n-523-2019-regulamenta-os-instrumentos-de-promocao-ao-desenvolvimento-sustentavel-previstos-na-lei-complementar-n-261-de-28-de-fevereiro-de-2008-plano->

diretor-de-desenvolvimento-sustentavel-de-joinville. Acesso em: 21 set. 2020.

KNISEL, W. G. CREAM. A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. Washinton: USDA, 1980.

KRAUSE, P; BOYLE, D. P.; BASE, F. Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment. **Advances in Geoscience**, [s. l.], v. 5, p. 89-97, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26438340_Comparison_of_Different_Efficiency_Criteria_for_Hydrologic_Models. Acesso em: 24 mar. 2021.

KUWAJIMA, J. I.; **Análise do Modelo Como Ferramenta de Prevenção e Estimativa de Assoreamento no Reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP)**. 2012. 158 f. Dissertação (Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/USP_512c20ffec52300eae544ba52defb629. Acesso em: 25 set. 2020.

LI, C.; FANG, H. Assessment of climate change impacts on the streamflow for the Mun River in the Mekong Basin, Southeast Asia: Using SWAT model. **Catena**, [s. l.], v. 201, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816221000588>. Acesso em: 27 abr. 2021.

LEONARD, R. A.; KNISEL, W. G.; STILL, D. A. GLEAMS: Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems. **Transaction of the ASAE**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 1403-1418, 1987. Disponível em: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/33>. Acesso em: 13 jul. 2020.

LINO, J. F. de L. **Análise da Dinâmica Hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Preto (SC) com o Modelo SWAT**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/92750>. Acesso em: 24 set. 2020.

MADANI, K. The value of extreme events: What doesn't exterminate your water system makes it more resilient. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 575, p. 269-272, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169419304949?via%3Dihub>. Acesso em: 08 jul. 2020.

MELLO, Y. de; KOEHNTOPP, P. I.; OLIVEIRA, T. M. N. de. Distribuição Pluviométrica Na Região De Joinville. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, [s. l.], v. 13, n. 1, 2015. Disponível em:

<http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/10151>. Acesso em: 06 jul. 2020.

MONTEAGUDO, D. H.; PALAZÓN, L.; BEGUERÍA, S. Long-term sustainability of large water resource systems under climate change: A cascade modeling approach. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 582, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169420300068?via%3Dihub>. Acesso em: 27 abr. 2021.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. EUA, Nova York: John Wiley, 2013.

MOREIRA, L. L.; SCHWAMBACK, D.; RIGO, D. Sensitivity Analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) Model n Streamflow Modeling in a Rural River Basin. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 13, n. 6, p. 1-12, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2018000600310&lng=en&nrm=iso&tling=en. Acesso em: 08 mar. 2021.

MORIASI, D. N. *et al.* Model Evaluation Guidelines for Systemic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transaction of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/43261199_Model_Evaluation_Guidelines_for_Systematic_Quantification_of_Accuracy_in_Watershed_Simulations. Acesso em: 16 set. 2020.

MOSS, R. H. *et al.* The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. **Nature**, [s. l.], v. 463, p. 747-756, 2010. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature08823>. Acesso em: 25 mar. 2021.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Theoretical Documentation** Version 2009. Temple: Blackland Research Center, 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>. Acesso em 25 set. 2020.

NEUPANE, R. P.; KUMAR, S. Estimating the Effects of Potential Climate and Land Use Changes on Hydrologic Processes of a Large Agriculture Dominated Watershed. **Journal of Hydrology**, v. 529, p. 418-429, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169415005569?via%3Dihub>. Acesso em: 05 nov. 2021.

NICODEM, L. V. S.; MINUZZI, R. B. Estimativa da evapotranspiração de referência diária com base na temperatura do ar para Campos Novos e São José, no estado de Santa Catarina. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 27, n.2, p. 339-345, 2020. Disponível em:

<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/agrometeoros/article/view/26468>. Acesso em: 02 ago. 2021.

OKI, T.; KANAE, S. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. **Science**, v. 313, p. 1068-1072, 2006. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/313/5790/1068.full>. Acesso em: 09 jul. 2020.

OLIVEIRA, T. M, N. de. *et al.* **Bacias Hidrográficas da Região de Joinville: Gestão de Dados**. Joinville: Editora Univille, 2017. Disponível em: <https://www.cubataojoinville.org.br/restrito/img/arquivos/bacias-hidrograficas-da-regiao-de-joinville--gestao-e-dados--2016-2851585072252.pdf>. Acesso em: 30 set. 2020.

PINIEWSKI, M.; BIEGER, K.; MEHDI, B. Advancements in Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for Ecohydrological Modelling and Application. **Ecohydrology & Hydrobiology**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 179-181, 2019. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1642359319300783>. Acesso em: 05 out. 2020.

PMJ – PREFEITURA MUNICIPAL DE JOINVILLE. Sistema de Informações Municipais Georreferenciadas – SIMGeo. **Zoneament LC 470/2017.shp**. Joinville: PMJ, 2017. Disponível em: <https://simgeo.joinville.sc.gov.br/>. Acesso em: 30 set. 2020.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? **Journal of Hydrological Engineering**, ASCE, p. 11-19, 1996. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0699%281996%291%3A1%2811%29>. Acesso em: 24 mar. 2021.

PONTES, L. M. *et al.* Hydrological Modeling of Tributaries of Cantareira System, Southeast Brazil, with the Swat Model. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 1037-1049, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162016000601037&lng=en&tlng=en. Acesso em: 01 out. 2020.

POTTER, R. O., CARVALHO, A. P. de; FLORES, C. A.; BOGNOLA, I. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/964417/solos-do-estado-de-santa-catarina>. Acesso em: 02 set. 2020.

PRADHAN, P.; TINGSANCHALI, T.; SHRESTHA, S. Evaluation of Soil and Water Assessment Tool and Artificial Neural Network Models for Hydrologic Simulation in Different Climatic Regions of Asia. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 701, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719342974?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jul. 2020.

QGIS. **QGIS**, 2021. Descubra o QGIS. Disponível em: https://www.qgis.org/pt_BR/site/about/index.html. Acesso em: 24 mar. 2021.

QI, J. *et al.* Effects of surface runoff and infiltration partition methods on hydrological modeling: A comparison of four schemes in two watersheds in the Northeastern US. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 581, 2020. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0022169419311503?via%3Dihub>. Acesso em: 27 abr. 2021.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: Eesc-USPP, 1998.

SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F. Sensitivity Analysis as an Ingredient of Modeling. **Statistical Science**, v. 15, n. 4, p. 377–395, 2000. Disponível em: <https://projecteuclid.org/journals/statistical-science/volume-15/issue-4/Sensitivity-Anaysis-as-an-Ingredient-of-Modeling/10.1214/ss/1009213004.full>. Acesso em: 10 mar. 2021.

SAMA. **Área Urbana Consolidada de Joinville: Metodologia de Identificação e Delimitação e Diagnóstico Socioambiental**. Joinville: Prefeitura de Joinville, 2016. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/publicacoes/area-urbana-consolidada-de-joinville-metodologia-de-identificacao-e-delimitacao-e-diagnostico-socioambiental/>. Acesso em: 21 set. 2020.

SANTA CATARINA. **Lei nº 9.748, de 30 de novembro de 1994**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências [1994]. Florianópolis Disponível em: http://leis.alesc.sc.gov.br/html/1994/9748_1994_lei.html. Acesso em: 06 out. 2021.

_____. **Portaria SDS nº 37, de 30 de julho de 2008**. Outorga Usuários Bacia Cubatão Norte [2008a]. Disponível em: http://www.cadastro.aguas.sc.gov.br/sirhsc/conteudo_visualizar_dinamico.jsp?idEmpresa=12&idMenu=715&idMenuPai=512. Acesso em: 01 out. 2021.

_____. **Portaria SDS nº 38, de 06 de novembro de 2006**. Dispõe sobre os critérios de natureza técnica a serem observados no exame dos pedidos de outorga dos usuários da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão (norte) e dá outras providências [2006]. Disponível em: http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/Diretoria%20de%20Recursos%20Hidricos/Legislacoes/Estadual/portarias/Portaria_SDE_38_2006.pdf. Acesso em: 01 out. 2021.

_____. **Portaria SDS nº 51, de 02 de outubro de 2008**. Altera a Portaria SDS nº 36, de 29 de julho de 2008 [2008b]. Disponível em: http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhsc/conteudo_visualizar_dinamico.jsp

?idEmpresa=12&idMenu=1011&idMenuPai=333. Acesso em: 01 out. 2021.

SANTOS, J. Y. G. dos, *et al.* Modeling the Impacts of Future LULC and Climate Change on Runoff and Sediment Yield in a Strategic Basin in the Caatinga/Atlantic Forest Ecotone of Brazil. **Catena**, v. 203, art. 105308, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816221001673?via%3Dihub>. Acesso em: 05 nov. 2021.

SDS – SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL. Modelo Digital de Elevação. **MDT_SDS_5m.tif**. Florianópolis: 2012. Disponível em: <https://www.sds.sc.gov.br/>. Acesso em: 02 set. 2020.

SEEG/OG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Projeto MapBiomass – Coleção v.6.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. Brasil, 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/superficie-de-agua-no-brasil-reduz-15-desde-o-inicio-dos-anos-90>. Acesso em: 02 set. 2021.

SEPUD – SECRETARIA DE PLANEJAMENTO URBANO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Cidade em Dados: Ambiente Natural**. Joinville: Prefeitura Municipal, 2020. Disponível em <https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2020/06/Joinville-Cidade-em-Dados-2020-Ambiente-Natural-30062020.pdf>. Acesso em: 06 out. 2020.

_____. **Joinville Bairro a Bairro 2017**. Joinville, Prefeitura Municipal, 2017. Disponível em: <https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2017/01/Joinville-Bairro-a-Bairro-2017.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.

SILVA, B. F. da. **Análise dos Parâmetros do Modelo Hidrossedimentológico SWAT na Bacia Hidrográfica do Córrego Samambaia, Goiânia-Go**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestre em Engenharia do Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5154>. Acesso em: 15 jul. 2020.

SILVA, R.T.; PORTO, M.F.A. Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração. **Estudos avançados**, [s. l.], v. 17, n. 47, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/hkQLGRnjV85nqf7F8gKpNJd/?lang=pt>. Acesso em: 09 set. 2021.

SILVA, Vitor dos Santos da. Comparação das vazões mínimas para a estação Pirabeiraba no rio Cubatão, norte de Santa Catarina, e implicações na gestão dos recursos hídricos. 2019 100 f. Trabalhos de

Conclusão de Curso (Graduação)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Curso de Engenharia Civil, Joinville, 2019 Disponível em: <http://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/000074/0000741e.pdf>

SILVEIRA, W. N. **Análise histórica de inundações no município de Joinville - SC, com enfoque na bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Norte**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/91644/250774.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 17 ago. 2021.

SILVEIRA, C. da S.; SOUZA FILHO, F. de A. de; COSTA, A. A.; CABRAL, S. L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbmet/v28n3/08.pdf>. Acesso em 29 set. 2020.

SIMON, F. W.; PICKBRENNER, K.; MARCUZZO, F. F. N. **Estudo do Regime Pluvial e Fluvial em Bacia Hidrográfica com Precipitação Homogênea**, 2013. IN: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, 2013. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/abrh/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013__PAP012888.pdf. Acesso em: 21 set. 2020.

SOBOL', I. M. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. **Matem. Modelirovanie**, v. 2, p. 112-118, 1990. Disponível em: <http://www.mathnet.ru/links/a129970c3e0d74b72d7e20779cf2729d/mm2320.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2021.

SWAT – SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL. **SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL**, 2021. Software, plus. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/software/plus/>. Acesso em: 11 mar. 2021.

TAN, M. L.; YANG, X. Effect of Rainfall Station Density, Distribution and Missing Values on SWAT Output in Tropical Region. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 584, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169420301207?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jul. 2020.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, J. S.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. **American Meteorological Society**, [s. l.], v. 93, n. 4, p. 485-498, 2012. Disponível em: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design in: Bulletin of the American Meteorological Society Volume 93 Issue 4 (2012) (ametsoc.org). Acesso em: 24 maio 2021.

TECH, J. **SWAT+ Editor 2.0 Documentation**. Texas A&M AgriLife Research, Texas, 2021. Disponível em: <https://swatplus.gitbook.io/docs/download-docs>. Acesso em: 11 mar. 2021.

TOLSON, B. A.; ASADZADEH, M; MAIER, H. R.; ZECCHIN, A. Hybrid Discrete Dynamically Dimensioned Search (HD-DDS) Algorithm for Water Distribution System Design Optimization. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 45, n. 12, 2009. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008WR007673>. Acesso em: 11 mar. 2021.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically Dimensioned Search Algorithm for Computationally Efficient Watershed Model Calibration. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 43, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005WR004723>. Acesso em: 11 mar. 2021.

TOUSEEF, M. *et al.* Assessment of the Future Climate Change Projections on Streamflow Hydrology and Water Availability over Upper Xijiang River Basin, China. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 10, art. 3671, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3671>. Acesso em: 15 set. 2021.

TRANG, N. T. T. *et al.* Evaluating the Impacts of Climate and Land-Use Change on the Hydrology and Nutrient Yield on a Transboundary River Basin: A Case Study In the 3S River Basin (Sekong, Sesan, And Srepok). **Science of The Total Environment**. [s. l.], v. 576, n. 15, p. 586-598, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0048969716323282?via%3Dihub>. Acesso em: 05 out. 2020.

TUCCI, C. E. M. **Gestão das Inundações Urbanas**. Porto Alegre: UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, 2005. Disponível em: https://labgeologiaambiental.jatai.ufg.br/up/285/o/Gest%C3%A3o_de_Aguas_Pluviais_.PDF?1370615799. Acesso em: 02 jul. 2020.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/23877127/Hidrologia-Ci%C3%AAncia_e_Aplica%C3%A7%C3%A3o_4a_Ed._Carlos_Tucci_CAP. Acesso em: 05 jul. 2020.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2006. Disponível em:

https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/sqa_3.pdf. Acesso em: 22 set. 2020.

UBERTI, A. A. A. **Boletim Técnico do Levantamento da Cobertura Pedológica do Município de Joinville**. Joinville: Prefeitura Municipal de Joinville, 2011. Disponível em: http://sistemaspmj.joinville.sc.gov.br/documentos_vivacidade/Mapa%20de%20Fragilidade%20Ambiental%20de%20Joinville/Boletins/Boletim%20T%C3%A9cnico%20do%20Munic%C3%ADpio%20de%20JOINVILLE%20-%20RF.pdf. Acesso em: 03 set 2020.

UNESCO, UN-Water. United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. França, Paris: UNESCO, 2020. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2020/>. Acesso em: 27 abr. 2021.

UNIVILLE / MPF. Babitonga Ativa. **USO_DO_SOLO_BABITONGA.shp**. Joinville: 2016. Disponível em: <https://www.babitongaativa.com/>. Acesso em: 02 set. 2020.

UN-Water, FAO. **Coping with Water Scarcity. Challenge of the twenty-first century**. Geneva, Suíça: 2007. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-aq444e.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2020.

USDA. Part 630: Hydrology Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. In: _____. **National Engineering Handbook**. Washinton, EUA: Natural Resources Conservation Service, p. 1-22, 2004. Disponível em: <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17752.wba>. Acesso em: 24 mar 2021.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na Simulação da Produção de sedimentos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/19124>. Acesso em: 05 jul. 2020.

VEIGA, D. P. B. da; GUANDIQUE, M. E. G.; NARDOCCI, A. C. Land use and water quality in watersheds in the State of São Paulo, based on GIS and SWAT data. **Revista Ambiente & Água**, [s. l.], v. 14, n. 5, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/QjkZD9gbFNQNRmCsQ8Qgfgq/?lang=en>. Acesso em: 15 jul. 2021.

VEIGA, L. B. E.; MAGRINI, A. The Brazilian Water Resources Management Policy: Fifteen Years of Success and Challenges. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 27, n. 7., p 2287-2302, 2013.

Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/257673138_The_Brazilian_Water_Resources_Management_Policy_Fifteen_Years_of_Success_and_Challenges. Acesso em: 08 out. 2021.

VIESSMAN, W.; LEWIS, G. L.; KNAPP, J. W. **Introduction to Hydrology**. 4 ed. Califórnia: Harpercollins College Div, 1989.

WATANABE, S. *et al.* MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. **Geoscientific Model Development Discussions**, [s. l.], v. 4, p. 163-1128, 2011. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/preprints/4/1063/2011/gmdd-4-1063-2011.pdf>. Acesso em: 26 maio 2021.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. **Journal of the American Water Resources Association**. [s. l.], v. 41, n. 5, p. 1077-1089, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez74.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03786.x>. Acesso em: 25 set. 2020.

WILLIAMS, J. R. **Sediment – Yield prediction with universal equation using runoff energy factor**, p. 244-252, 1972 In: PROCEEDINGS OF THE SEDIMENT-YIELD WORKSHOP, Mississippi. United States Department of Agriculture, 1975. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Sediment-yield-prediction-with-Universal-Equation-Williams/a9bc4612310f980c973575cbf86c63b77a01ace1>. Acesso em: 10 set. 2020.

WILLIAMS, J. R.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; GASSMAN, P. W.; GREEN, C. H. History of model development at Temple, Texas. **Hydrologica Sciences Journal**, [s. l.], v. 53, n. 5, p. 948-960, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.53.5.948>. Acesso em: 08 jul. 2020.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. A Modeling Approach to Determining the Relationship Between Erosion and Soil Productivity. **Transaction of the ASAE**, [s. l.], v. 27, p.129-144, 1984. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32748>. Acesso em: 13 jul. 2020.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018**. Geneva, Suíça: WMO, 2019. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789. Acesso em: 28 abr. 2021.

WWAP – WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAM. **The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs.** Paris: UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, 2016. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2016-water-and-jobs/>. Acesso em: 08 jul. 2020.

XAVIER, C. F. Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba – Paraná. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia- Área de Concentração "Ciência do Solo") - Curso de Pós Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Paraná, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/58508/R%20-%20D%20-%20CHRISTINE%20DA%20FONSECA%20XAVIER.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 jul. 2020.

XIONG, X. *et al.* Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. **Science of The Total Environment**, v. 493, p. 97-982, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez74.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0048969714009619>. Acesso em: 05 nov. 2021.

ZARRINEH, N.; ABBASPOUR, K.; HOLSZKÄMPER, A. Integrated Assessment of Climate Change Impacts on Multiple Ecosystem Services in Western Switzerland. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 708, art. 135212, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719352040?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jul. 2020.

ZHAO, P. *et al.* Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. **Quaternary International**, [s. l.], v. 513, p. 37-46, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S104061821831053X?via%3Dihub>. Acesso em: 28 abr. 2021.

ZHAO, J.-T.; SU, B.-D.; MONDAL, S. K.; WANG, Y.-J.; TAO, H.; JIANG, T. Population exposure to precipitation extremes in the Indus River Basin at 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C warming levels. **Advances in Climate Change Research**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 199-209, 2021. Disponível em: Population exposure to precipitation extremes in the Indus River Basin at 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C warming levels - ScienceDirect. Acesso em: 06 set. 2021.

APÊNDICE A – MÉDIAS MENSAIS DAS PRECIPITAÇÕES ESTIMADAS

Tabela 36 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	373.3	285.2	-23.6%	311.6	-16.5%	298.4	-20.1%
Fevereiro	269.8	194.5	-27.9%	194.3	-28.0%	194.4	-27.9%
Março	276.7	195.9	-29.2%	210.7	-23.9%	203.3	-26.5%
Abril	154.9	126.4	-18.4%	119.4	-22.9%	122.9	-20.7%
Mai	131.0	96.3	-26.5%	120.5	-8.0%	108.4	-17.3%
Junho	128.5	122.9	-4.4%	86.8	-32.5%	104.8	-18.4%
Julho	127.3	95.1	-25.3%	68.8	-45.9%	81.9	-35.6%
Agosto	108.7	113.2	4.1%	92.9	-14.6%	103.0	-5.2%
Setembro	203.0	175.5	-13.6%	169.3	-16.6%	172.4	-15.1%
Outubro	215.7	178.2	-17.4%	183.9	-14.7%	181.1	-16.0%
Novembro	261.3	187.6	-28.2%	170.2	-34.9%	178.9	-31.5%
Dezembro	223.6	235.1	5.1%	244.3	9.2%	239.7	7.2%
Ano. Hid. Comp.	206.2	167.1	-18.9%	164.4	-20.3%	165.8	-19.6%
Época Úmida	260.5	207.4	-20.4%	212.0	-18.6%	209.7	-19.5%
Época Seca	130.1	110.8	-14.9%	97.7	-24.9%	104.2	-19.9%

Tabela 37 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 4.5)

GCM4 - RCP 4.5	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	373.3	302.4	-19.0%	307.4	-17.7%	304.9	-18.3%
Fevereiro	269.8	289.7	7.4%	263.7	-2.3%	276.7	2.6%
Março	276.7	194.5	-29.7%	194.3	-29.8%	194.4	-29.7%
Abril	154.9	128.6	-17.0%	129.4	-16.5%	129.0	-16.7%
Mai	131.0	106.8	-18.5%	108.7	-17.0%	107.8	-17.8%
Junho	128.5	145.7	13.4%	111.3	-13.4%	128.5	0.0%
Julho	127.3	83.0	-34.8%	98.0	-23.0%	90.5	-28.9%
Agosto	108.7	106.5	-2.0%	78.9	-27.4%	92.7	-14.7%
Setembro	203.0	175.8	-13.4%	179.0	-11.9%	177.4	-12.6%
Outubro	215.7	187.4	-13.1%	170.8	-20.8%	179.1	-17.0%
Novembro	261.3	186.2	-28.7%	200.1	-23.4%	193.2	-26.1%
Dezembro	223.6	230.1	2.9%	232.5	4.0%	231.3	3.5%
Ano. Hid. Comp.	206.2	178.1	-13.6%	172.8	-16.2%	175.5	-14.9%
Época Úmida	260.5	223.7	-14.1%	221.1	-15.1%	222.4	-14.6%
Época Seca	130.1	114.1	-12.3%	105.3	-19.1%	109.7	-15.7%

Tabela 38 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	373.3	303.8	-18.6%	338.3	-9.4%	321.1	-14.0%
Fevereiro	269.8	241.3	-10.6%	290.9	7.8%	266.1	-1.4%
Março	276.7	174.7	-36.8%	175.7	-36.5%	175.2	-36.7%
Abril	154.9	130.0	-16.1%	130.0	-16.1%	130.0	-16.1%
Maio	131.0	123.7	-5.6%	106.0	-19.1%	114.8	-12.4%
Junho	128.5	83.2	-35.2%	139.2	8.3%	111.2	-13.5%
Julho	127.3	110.2	-13.4%	82.6	-35.1%	96.4	-24.3%
Agosto	108.7	96.5	-11.2%	101.2	-6.9%	98.9	-9.0%
Setembro	203.0	168.8	-16.9%	166.0	-18.2%	167.4	-17.6%
Outubro	215.7	206.5	-4.3%	201.1	-6.7%	203.8	-5.5%
Novembro	261.3	177.7	-32.0%	194.0	-25.8%	185.8	-28.9%
Dezembro	223.6	229.7	2.7%	242.0	8.2%	235.8	5.5%
Ano. Hid. Comp.	206.2	170.5	-17.3%	180.6	-12.4%	175.5	-14.8%
Época Úmida	260.5	214.6	-17.6%	229.7	-11.8%	222.2	-14.7%
Época Seca	130.1	108.7	-16.4%	111.8	-14.1%	110.3	-15.2%

Tabela 39 – Médias Mensais das Precipitações Estimadas (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	373.3	309.8	-17.0%	309.7	-17.0%	309.8	-17.0%
Fevereiro	269.8	267.2	-1.0%	264.3	-2.0%	265.8	-1.5%
Março	276.7	177.2	-36.0%	191.8	-30.7%	184.5	-33.3%
Abril	154.9	129.6	-16.4%	145.0	-6.4%	137.3	-11.4%
Mai	131.0	134.0	2.2%	148.0	12.9%	141.0	7.6%
Junho	128.5	114.1	-11.2%	164.7	28.1%	139.4	8.5%
Julho	127.3	85.4	-32.9%	83.1	-34.7%	84.3	-33.8%
Agosto	108.7	98.2	-9.6%	76.4	-29.7%	87.3	-19.7%
Setembro	203.0	152.2	-25.0%	145.0	-28.6%	148.6	-26.8%
Outubro	215.7	188.8	-12.5%	196.5	-8.9%	192.6	-10.7%
Novembro	261.3	191.6	-26.7%	245.5	-6.1%	218.6	-16.4%
Dezembro	223.6	226.1	1.1%	279.2	24.9%	252.6	13.0%
Ano. Hid. Comp.	206.2	172.9	-16.2%	187.4	-9.1%	180.1	-12.6%
Época Úmida	260.5	216.1	-17.0%	233.2	-10.5%	224.6	-13.8%
Época Seca	130.1	112.3	-13.7%	123.4	-5.1%	117.8	-9.4%

APÊNDICE B – MÉDIAS MENSAIS DAS TEMPERATURAS ESTIMADAS

Tabela 40 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	Histórico (°C)	1ª Metade (°C)		2ª Metade (°C)		Total (°C)	
Janeiro	26.6	29.0	8.8%	29.6	11.1%	29.3	10.0%
Fevereiro	27.0	28.0	3.4%	28.8	6.6%	28.4	5.0%
Março	26.5	28.0	5.4%	28.2	6.4%	28.1	5.9%
Abril	24.2	25.7	5.9%	26.0	7.3%	25.8	6.6%
Mai	21.7	24.5	13.0%	23.8	9.6%	24.2	11.3%
Junho	19.7	22.5	13.9%	22.0	11.6%	22.2	12.8%
Julho	18.6	22.4	20.9%	21.8	17.4%	22.1	19.1%
Agosto	19.5	23.0	18.1%	22.6	16.0%	22.8	17.1%
Setembro	20.3	23.4	14.9%	22.7	11.6%	23.0	13.2%
Outubro	21.9	24.2	10.7%	24.0	9.9%	24.1	10.3%
Novembro	23.8	25.5	7.2%	26.3	10.7%	25.9	8.9%
Dezembro	25.6	27.3	6.6%	27.9	8.7%	27.6	7.6%
Ano. Hid. Comp.	23.0	25.3	10.7%	25.3	10.6%	25.3	10.6%
Época Úmida	24.6	26.5	7.8%	26.8	9.2%	26.6	8.5%
Época Seca	20.8	23.6	13.9%	23.3	12.1%	23.4	13.0%

Tabela 41 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 4.5)

GCM4 - RCP 4.5	Histórico (°C)	1ª Metade (°C)		2ª Metade (°C)		Total (°C)	
Janeiro	26.6	28.8	8.0%	29.5	10.7%	29.1	9.4%
Fevereiro	27.0	28.5	5.4%	29.5	9.1%	29.0	7.2%
Março	26.5	28.0	5.3%	28.8	8.6%	28.4	7.0%
Abril	24.2	25.5	5.1%	26.2	8.2%	25.9	6.7%
Mai	21.7	23.7	9.2%	24.4	12.7%	24.1	11.0%
Junho	19.7	21.4	8.4%	22.8	15.7%	22.1	12.0%
Julho	18.6	21.5	15.9%	22.2	19.4%	21.8	17.7%
Agosto	19.5	22.4	14.7%	24.0	23.2%	23.2	19.0%
Setembro	20.3	22.4	10.3%	23.5	15.5%	23.0	12.9%
Outubro	21.9	23.7	8.4%	24.6	12.3%	24.2	10.4%
Novembro	23.8	25.2	6.0%	26.0	9.2%	25.6	7.6%
Dezembro	25.6	27.1	5.9%	27.7	8.1%	27.4	7.0%
Ano. Hid. Comp.	23.0	24.9	8.6%	25.8	12.7%	25.3	10.6%
Época Úmida	24.6	26.3	6.9%	27.1	10.3%	26.7	8.6%
Época Seca	20.8	22.9	10.3%	23.9	15.4%	23.4	12.9%

Tabela 42 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	Histórico (°C)	1ª Metade (°C)		2ª Metade (°C)		Total (°C)	
Janeiro	26.6	29.2	9.6%	29.6	11.3%	29.4	10.5%
Fevereiro	27.0	29.6	9.5%	29.5	8.9%	29.5	9.2%
Março	26.5	28.5	7.5%	29.2	10.0%	28.9	8.7%
Abril	24.2	26.3	8.3%	26.6	9.7%	26.4	9.0%
Maio	21.7	24.0	10.8%	24.7	13.8%	24.4	12.3%
Junho	19.7	22.5	14.3%	22.8	15.3%	22.7	14.8%
Julho	18.6	22.1	19.3%	22.7	22.5%	22.4	20.9%
Agosto	19.5	23.0	18.1%	23.6	20.8%	23.3	19.5%
Setembro	20.3	23.2	13.9%	23.6	15.8%	23.4	14.9%
Outubro	21.9	23.9	9.2%	24.3	10.9%	24.1	10.1%
Novembro	23.8	25.8	8.3%	26.2	10.2%	26.0	9.2%
Dezembro	25.6	27.5	7.2%	27.8	8.4%	27.6	7.8%
Ano. Hid. Comp.	23.0	25.5	11.3%	25.9	13.1%	25.7	12.2%
Época Úmida	24.6	26.8	9.2%	27.2	10.6%	27.0	9.9%
Época Seca	20.8	23.6	13.8%	24.1	16.0%	23.8	14.9%

Tabela 43 – Médias Mensais das Temperaturas Estimadas (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	Histórico (°C)	1ª Metade (°C)		2ª Metade (°C)		Total (°C)	
Janeiro	26.6	29.5	10.7%	31.6	18.7%	30.6	14.7%
Fevereiro	27.0	29.0	7.2%	31.9	18.0%	30.5	12.6%
Março	26.5	28.8	8.6%	31.2	17.6%	30.0	13.1%
Abril	24.2	26.6	9.7%	28.4	17.2%	27.5	13.5%
Maio	21.7	24.4	12.6%	26.2	20.9%	25.3	16.7%
Junho	19.7	22.6	14.5%	24.2	22.8%	23.4	18.6%
Julho	18.6	22.6	21.9%	24.3	31.1%	23.5	26.5%
Agosto	19.5	23.8	22.2%	25.4	30.2%	24.6	26.2%
Setembro	20.3	24.0	17.8%	26.2	28.7%	25.1	23.3%
Outubro	21.9	25.0	14.3%	26.7	22.2%	25.9	18.3%
Novembro	23.8	26.0	9.4%	28.0	17.7%	27.0	13.6%
Dezembro	25.6	27.9	8.7%	29.9	16.6%	28.9	12.6%
Ano. Hid. Comp.	23.0	25.9	13.1%	27.9	21.8%	26.9	17.5%
Época Úmida	24.6	27.2	10.7%	29.4	19.6%	28.3	15.1%
Época Seca	20.8	24.0	15.7%	25.7	23.9%	24.9	19.8%

APÊNDICE C – MÉDIAS MENSAIS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PARA C-2

Tabela 44 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	148.3	14.8%	151.5	17.2%	149.9	16.0%
Fevereiro	108.9	122.8	12.8%	128.5	18.0%	125.7	15.4%
Março	105.9	115.3	8.9%	118.1	11.5%	116.7	10.2%
Abril	77.8	86.1	10.7%	87.0	11.8%	86.5	11.2%
Mai	58.1	68.5	17.9%	66.4	14.2%	67.4	16.1%
Junho	46.2	55.0	19.0%	52.8	14.4%	53.9	16.7%
Julho	47.7	61.0	27.8%	54.6	14.4%	57.8	21.1%
Agosto	58.2	70.7	21.5%	67.5	15.9%	69.1	18.7%
Setembro	67.8	89.3	31.8%	86.1	27.0%	87.7	29.4%
Outubro	88.7	111.9	26.1%	111.6	25.8%	111.8	26.0%
Novembro	102.7	125.1	21.9%	128.1	24.8%	126.6	23.3%
Dezembro	118.6	140.9	18.8%	144.8	22.1%	142.8	20.4%
Ano. Hid. Comp.	84.1	99.6	18.3%	99.7	18.5%	99.7	18.4%
Época Úmida	103.1	122.0	18.3%	124.1	20.3%	123.0	19.3%
Época Seca	57.6	68.3	18.5%	65.6	14.0%	67.0	16.2%

Tabela 45 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 4.5)

GCM4 - RCP 4.5	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	144.5	11.8%	145.0	12.2%	144.7	12.0%
Fevereiro	108.9	118.8	9.2%	123.0	12.9%	120.9	11.1%
Março	105.9	115.2	8.7%	117.5	10.9%	116.3	9.8%
Abril	77.8	84.1	8.1%	83.5	7.3%	83.8	7.7%
Mai	58.1	65.1	12.0%	67.2	15.7%	66.1	13.9%
Junho	46.2	51.9	12.3%	52.2	13.1%	52.0	12.7%
Julho	47.7	57.4	20.1%	56.4	18.1%	56.9	19.1%
Agosto	58.2	68.0	16.9%	66.5	14.3%	67.3	15.6%
Setembro	67.8	85.0	25.4%	84.6	24.9%	84.8	25.1%
Outubro	88.7	109.2	23.1%	108.1	21.8%	108.7	22.5%
Novembro	102.7	122.6	19.5%	124.2	21.0%	123.4	20.2%
Dezembro	118.6	137.6	16.0%	137.3	15.7%	137.4	15.9%
Ano. Hid. Comp.	84.1	96.6	14.8%	97.1	15.4%	96.9	15.1%
Época Úmida	103.1	119.0	15.4%	119.9	16.3%	119.5	15.9%
Época Seca	57.6	65.3	13.3%	65.2	13.1%	65.2	13.2%

Tabela 46 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	148.1	14.6%	147.9	14.4%	148.0	14.5%
Fevereiro	108.9	125.8	15.6%	124.2	14.1%	125.0	14.8%
Março	105.9	113.9	7.5%	112.5	6.3%	113.2	6.9%
Abril	77.8	85.6	10.1%	84.1	8.1%	84.9	9.1%
Mai	58.1	66.5	14.5%	65.5	12.7%	66.0	13.6%
Junho	46.2	56.1	21.4%	51.4	11.3%	53.7	16.3%
Julho	47.7	57.0	19.4%	57.4	20.1%	57.2	19.8%
Agosto	58.2	72.7	25.0%	68.9	18.5%	70.8	21.7%
Setembro	67.8	86.5	27.6%	86.4	27.5%	86.5	27.6%
Outubro	88.7	110.7	24.8%	107.6	21.2%	109.1	23.0%
Novembro	102.7	127.1	23.8%	127.2	23.9%	127.1	23.9%
Dezembro	118.6	141.3	19.1%	140.5	18.4%	140.9	18.8%
Ano. Hid. Comp.	84.1	99.3	18.0%	97.8	16.2%	98.5	17.1%
Época Úmida	103.1	121.9	18.2%	120.9	17.3%	121.4	17.7%
Época Seca	57.6	67.6	17.4%	65.4	13.6%	66.5	15.5%

Tabela 47 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-2 (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	150.5	16.4%	155.3	20.1%	152.9	18.3%
Fevereiro	108.9	123.5	13.5%	132.1	21.4%	127.8	17.4%
Março	105.9	116.5	10.0%	121.6	14.8%	119.0	12.4%
Abril	77.8	87.2	12.2%	88.3	13.5%	87.8	12.8%
Mai	58.1	69.3	19.3%	66.6	14.7%	68.0	17.0%
Junho	46.2	57.4	24.2%	53.8	16.4%	55.6	20.3%
Julho	47.7	62.9	31.7%	58.7	22.9%	60.8	27.3%
Agosto	58.2	66.7	14.6%	64.0	9.9%	65.3	12.3%
Setembro	67.8	87.3	28.7%	85.3	25.8%	86.3	27.3%
Outubro	88.7	114.9	29.5%	117.1	32.0%	116.0	30.8%
Novembro	102.7	128.6	25.2%	134.1	30.6%	131.3	27.9%
Dezembro	118.6	142.8	20.4%	151.8	28.0%	147.3	24.2%
Ano. Hid. Comp.	84.1	100.6	19.6%	102.4	21.7%	101.5	20.6%
Época Úmida	103.1	123.4	19.7%	128.2	24.3%	125.8	22.0%
Época Seca	57.6	68.7	19.3%	66.3	15.0%	67.5	17.1%

APÊNDICE D – MÉDIAS MENSAIS DA VAZÃO ESTIMADA PARA C-2

Tabela 48 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	17.15	-41.4%	21.78	-25.6%	19.47	-33.5%
Fevereiro	24.85	24.25	-2.4%	24.12	-2.9%	24.18	-2.7%
Março	22.24	12.12	-45.5%	14.96	-32.7%	13.54	-39.1%
Abril	16.92	8.05	-52.4%	7.40	-56.3%	7.73	-54.3%
Mai	13.96	5.93	-57.5%	8.06	-42.2%	6.99	-49.9%
Junho	14.12	7.50	-46.9%	5.98	-57.7%	6.74	-52.3%
Julho	14.45	5.44	-62.3%	3.05	-78.9%	4.25	-70.6%
Agosto	11.16	6.39	-42.8%	3.87	-65.3%	5.13	-54.0%
Setembro	18.24	9.40	-48.4%	8.88	-51.3%	9.14	-49.9%
Outubro	21.38	9.10	-57.4%	10.11	-52.7%	9.60	-55.1%
Novembro	23.99	8.69	-63.8%	7.58	-68.4%	8.14	-66.1%
Dezembro	23.22	12.59	-45.8%	13.11	-43.5%	12.85	-44.7%
Ano. Hid. Comp.	19.48	10.55	-45.8%	10.74	-44.9%	10.65	-47.7%
Época Úmida	23.31	13.33	-42.8%	14.36	-38.4%	13.85	-40.6%
Época Seca	14.12	6.66	-52.8%	5.67	-59.8%	6.17	-56.3%

Tabela 49 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 4.5)

GCM4 - RCP 4.5	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	20.15	-31.2%	22.28	-23.9%	21.21	-27.5%
Fevereiro	24.85	24.98	0.5%	20.96	-15.7%	22.97	-7.6%
Março	22.24	12.60	-43.3%	13.41	-39.7%	13.01	-41.5%
Abril	16.92	8.15	-51.8%	8.52	-49.6%	8.34	-50.7%
Maio	13.96	7.14	-48.8%	7.70	-44.8%	7.42	-46.8%
Junho	14.12	11.47	-18.8%	7.87	-44.3%	9.67	-31.5%
Julho	14.45	5.30	-63.4%	6.40	-55.7%	5.85	-59.5%
Agosto	11.16	5.59	-49.9%	3.82	-65.8%	4.70	-57.9%
Setembro	18.24	9.97	-45.4%	9.81	-46.2%	9.89	-45.8%
Outubro	21.38	10.57	-50.6%	9.06	-57.6%	9.81	-54.1%
Novembro	23.99	9.18	-61.7%	10.96	-54.3%	10.07	-58.0%
Dezembro	23.22	12.78	-45.0%	13.15	-43.4%	12.97	-44.2%
Ano. Hid. Comp.	19.48	11.49	-41.0%	11.16	-42.7%	11.33	-43.8%
Época Úmida	23.31	14.32	-38.6%	14.23	-39.0%	14.28	-38.8%
Época Seca	14.12	7.53	-46.7%	6.86	-51.4%	7.20	-49.0%

Tabela 50 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	20.54	-29.8%	25.69	-12.2%	23.12	-21.0%
Fevereiro	24.85	17.63	-29.1%	26.38	6.2%	22.00	-11.5%
Março	22.24	9.47	-57.4%	11.31	-49.2%	10.39	-53.3%
Abril	16.92	7.89	-53.4%	8.62	-49.0%	8.26	-51.2%
Maio	13.96	7.91	-43.3%	7.41	-46.9%	7.66	-45.1%
Junho	14.12	4.78	-66.2%	11.02	-21.9%	7.90	-44.1%
Julho	14.45	6.62	-54.2%	5.13	-64.5%	5.87	-59.4%
Agosto	11.16	4.39	-60.7%	4.53	-59.5%	4.46	-60.1%
Setembro	18.24	8.93	-51.0%	9.33	-48.8%	9.13	-49.9%
Outubro	21.38	11.58	-45.8%	12.25	-42.7%	11.92	-44.3%
Novembro	23.99	8.42	-64.9%	10.47	-56.4%	9.44	-60.6%
Dezembro	23.22	11.43	-50.8%	13.78	-40.7%	12.60	-45.7%
Ano. Hid. Comp.	19.48	9.97	-48.9%	12.16	-37.6%	11.06	-45.5%
Época Úmida	23.31	12.57	-46.1%	15.60	-33.1%	14.09	-39.6%
Época Seca	14.12	6.32	-55.3%	7.34	-48.0%	6.83	-51.6%

Tabela 51 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-2 (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	19.67	-32.8%	22.02	-24.8%	20.84	-28.8%
Fevereiro	24.85	21.51	-13.4%	21.81	-12.2%	21.66	-12.8%
Março	22.24	10.93	-50.8%	11.37	-48.9%	11.15	-49.9%
Abril	16.92	7.26	-57.1%	9.72	-42.5%	8.49	-49.8%
Maio	13.96	8.49	-39.1%	12.21	-12.5%	10.35	-25.8%
Junho	14.12	7.32	-48.2%	14.49	2.6%	10.90	-22.8%
Julho	14.45	5.05	-65.0%	6.29	-56.5%	5.67	-60.7%
Agosto	11.16	5.10	-54.3%	3.36	-69.9%	4.23	-62.1%
Setembro	18.24	7.86	-56.9%	6.84	-62.5%	7.35	-59.7%
Outubro	21.38	8.84	-58.6%	9.85	-53.9%	9.35	-56.3%
Novembro	23.99	8.43	-64.9%	14.65	-38.9%	11.54	-51.9%
Dezembro	23.22	11.58	-50.1%	17.73	-23.7%	14.66	-36.9%
Ano. Hid. Comp.	19.48	10.17	-47.8%	12.53	-35.7%	11.35	-43.1%
Época Úmida	23.31	12.69	-45.6%	14.90	-36.1%	13.79	-40.8%
Época Seca	14.12	6.65	-52.9%	9.21	-34.7%	7.93	-43.8%

APÊNDICE E – MÉDIAS MENSAIS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PARA C-3

Tabela 52 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	143.7	11.2%	146.8	13.5%	145.2	12.4%
Fevereiro	108.9	119.5	9.8%	125.0	14.8%	122.2	12.3%
Março	105.9	114.9	8.5%	118.1	11.5%	116.5	10.0%
Abril	77.8	86.7	11.4%	87.3	12.2%	87.0	11.8%
Mai	58.1	66.8	15.0%	64.6	11.2%	65.7	13.1%
Junho	46.2	53.4	15.6%	51.0	10.4%	52.2	13.0%
Julho	47.7	59.0	23.6%	52.9	10.7%	55.9	17.2%
Agosto	58.2	68.6	17.9%	65.3	12.3%	67.0	15.1%
Setembro	67.8	87.3	28.7%	84.1	24.0%	85.7	26.4%
Outubro	88.7	108.7	22.6%	108.5	22.2%	108.6	22.4%
Novembro	102.7	121.6	18.5%	124.3	21.1%	123.0	19.8%
Dezembro	118.6	136.5	15.1%	140.5	18.5%	138.5	16.8%
Ano. Hid. Comp.	84.1	97.2	15.5%	97.3	15.7%	97.3	15.6%
Época Úmida	103.1	118.9	15.3%	121.0	17.4%	120.0	16.3%
Época Seca	57.6	66.9	16.1%	64.2	11.5%	65.6	13.8%

Tabela 53 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 4.5)

GCM4 - RCP 4.5	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	140.2	8.5%	140.7	8.9%	140.5	8.7%
Fevereiro	108.9	115.7	6.3%	119.5	9.8%	117.6	8.0%
Março	105.9	114.8	8.4%	117.5	10.9%	116.2	9.7%
Abril	77.8	84.6	8.8%	83.6	7.5%	84.1	8.1%
Mai	58.1	63.6	9.4%	65.1	12.1%	64.3	10.8%
Junho	46.2	50.4	9.1%	50.8	9.9%	50.6	9.5%
Julho	47.7	55.4	16.1%	54.6	14.3%	55.0	15.2%
Agosto	58.2	65.9	13.3%	64.6	11.0%	65.2	12.1%
Setembro	67.8	82.8	22.2%	82.9	22.3%	82.9	22.3%
Outubro	88.7	106.2	19.7%	104.9	18.2%	105.6	19.0%
Novembro	102.7	119.1	16.0%	120.8	17.7%	119.9	16.8%
Dezembro	118.6	133.5	12.5%	133.2	12.3%	133.3	12.4%
Ano. Hid. Comp.	84.1	94.4	12.1%	94.8	12.7%	94.6	12.4%
Época Úmida	103.1	116.0	12.5%	117.1	13.5%	116.6	13.0%
Época Seca	57.6	64.0	11.1%	63.7	10.6%	63.9	10.9%

Tabela 54 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	143.5	11.0%	143.5	11.0%	143.5	11.0%
Fevereiro	108.9	122.1	12.2%	120.6	10.8%	121.4	11.5%
Março	105.9	113.7	7.4%	112.6	6.3%	113.2	6.8%
Abril	77.8	86.1	10.7%	84.3	8.3%	85.2	9.5%
Mai	58.1	65.1	12.0%	63.5	9.4%	64.3	10.7%
Junho	46.2	54.3	17.5%	49.9	8.0%	52.1	12.8%
Julho	47.7	55.3	15.8%	55.5	16.3%	55.4	16.1%
Agosto	58.2	70.3	20.9%	66.9	14.9%	68.6	17.9%
Setembro	67.8	84.4	24.5%	84.5	24.7%	84.5	24.6%
Outubro	88.7	107.5	21.2%	104.8	18.1%	106.1	19.6%
Novembro	102.7	123.3	20.1%	123.5	20.3%	123.4	20.2%
Dezembro	118.6	136.9	15.4%	136.4	15.0%	136.6	15.2%
Ano. Hid. Comp.	84.1	96.9	15.1%	95.5	13.5%	96.2	14.3%
Época Úmida	103.1	118.8	15.2%	118.0	14.4%	118.4	14.8%
Época Seca	57.6	66.2	15.0%	64.0	11.2%	65.1	13.1%

Tabela 55 – Médias Mensais da Evapotranspiração Estimada C-3 (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	Histórico (mm)	1ª Metade (mm)		2ª Metade (mm)		Total (mm)	
Janeiro	129.3	146.0	13.0%	150.3	16.3%	148.2	14.6%
Fevereiro	108.9	120.2	10.4%	128.4	18.0%	124.3	14.2%
Março	105.9	115.7	9.2%	121.9	15.1%	118.8	12.1%
Abril	77.8	88.1	13.2%	88.2	13.4%	88.1	13.3%
Mai	58.1	68.2	17.4%	64.8	11.6%	66.5	14.5%
Junho	46.2	55.6	20.4%	52.3	13.2%	53.9	16.8%
Julho	47.7	60.6	27.0%	56.9	19.2%	58.8	23.1%
Agosto	58.2	64.7	11.2%	62.4	7.2%	63.5	9.2%
Setembro	67.8	85.0	25.4%	83.4	23.0%	84.2	24.2%
Outubro	88.7	111.8	26.0%	113.7	28.1%	112.7	27.1%
Novembro	102.7	124.8	21.6%	130.6	27.2%	127.7	24.4%
Dezembro	118.6	138.6	16.8%	147.2	24.1%	142.9	20.5%
Ano. Hid. Comp.	84.1	98.3	16.8%	100.0	18.8%	99.1	17.8%
Época Úmida	103.1	120.3	16.7%	125.1	21.3%	122.7	19.0%
Época Seca	57.6	67.4	17.1%	64.9	12.7%	66.2	14.9%

APÊNDICE F – MÉDIAS MENSAIS DA VAZÃO ESTIMADA PARA C-3

Tabela 56 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	17.78	-39.3%	22.39	-23.5%	20.08	-31.4%
Fevereiro	24.85	24.71	-0.6%	24.63	-0.9%	24.67	-0.7%
Março	22.24	12.31	-44.7%	15.14	-31.9%	13.72	-38.3%
Abril	16.92	8.05	-52.4%	7.38	-56.4%	7.71	-54.4%
Mai	13.96	6.00	-57.0%	8.12	-41.8%	7.06	-49.4%
Junho	14.12	7.67	-45.7%	6.12	-56.7%	6.89	-51.2%
Julho	14.45	5.61	-61.2%	3.22	-77.7%	4.41	-69.4%
Agosto	11.16	6.60	-40.9%	4.08	-63.5%	5.34	-52.2%
Setembro	18.24	9.76	-46.5%	9.28	-49.1%	9.52	-47.8%
Outubro	21.38	9.48	-55.7%	10.49	-50.9%	9.98	-53.3%
Novembro	23.99	9.16	-61.8%	8.05	-66.4%	8.61	-64.1%
Dezembro	23.22	13.14	-43.4%	13.68	-41.1%	13.41	-42.3%
Ano. Hid. Comp.	19.48	10.85	-44.3%	11.05	-43.3%	10.95	-46.2%
Época Úmida	23.31	13.76	-41.0%	14.81	-36.5%	14.28	-38.7%
Época Seca	14.12	6.78	-52.0%	5.78	-59.0%	6.28	-55.5%

Tabela 57 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 4.5)

GCM4 - RCP 4.5	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	20.74	-29.2%	22.85	-22.0%	21.79	-25.6%
Fevereiro	24.85	25.43	2.3%	21.45	-13.7%	23.44	-5.7%
Março	22.24	12.78	-42.6%	13.57	-39.0%	13.17	-40.8%
Abril	16.92	8.14	-51.9%	8.51	-49.7%	8.32	-50.8%
Maio	13.96	7.19	-48.5%	7.78	-44.2%	7.49	-46.4%
Junho	14.12	11.64	-17.6%	8.02	-43.2%	9.83	-30.4%
Julho	14.45	5.42	-62.5%	6.60	-54.3%	6.01	-58.4%
Agosto	11.16	5.80	-48.1%	3.98	-64.4%	4.89	-56.2%
Setembro	18.24	10.33	-43.4%	10.15	-44.4%	10.24	-43.9%
Outubro	21.38	10.97	-48.7%	9.45	-55.8%	10.21	-52.3%
Novembro	23.99	9.62	-59.9%	11.40	-52.5%	10.51	-56.2%
Dezembro	23.22	13.25	-43.0%	13.66	-41.2%	13.45	-42.1%
Ano. Hid. Comp.	19.48	11.77	-39.6%	11.45	-41.2%	11.61	-42.4%
Época Úmida	23.31	14.73	-36.8%	14.65	-37.2%	14.69	-37.0%
Época Seca	14.12	7.64	-45.9%	6.98	-50.6%	7.31	-48.3%

Tabela 58 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	21.09	-28.0%	26.29	-10.2%	23.69	-19.1%
Fevereiro	24.85	18.10	-27.2%	26.84	8.0%	22.47	-9.6%
Março	22.24	9.66	-56.5%	11.42	-48.6%	10.54	-52.6%
Abril	16.92	7.88	-53.4%	8.62	-49.0%	8.25	-51.2%
Maio	13.96	8.01	-42.6%	7.50	-46.3%	7.75	-44.4%
Junho	14.12	4.90	-65.3%	11.21	-20.6%	8.06	-42.9%
Julho	14.45	6.80	-52.9%	5.27	-63.5%	6.04	-58.2%
Agosto	11.16	4.63	-58.5%	4.77	-57.3%	4.70	-57.9%
Setembro	18.24	9.29	-49.0%	9.64	-47.1%	9.47	-48.1%
Outubro	21.38	12.03	-43.8%	12.64	-40.9%	12.33	-42.3%
Novembro	23.99	8.83	-63.2%	10.94	-54.4%	9.88	-58.8%
Dezembro	23.22	12.01	-48.3%	14.32	-38.4%	13.16	-43.3%
Ano. Hid. Comp.	19.48	10.27	-47.3%	12.45	-36.1%	11.36	-44.0%
Época Úmida	23.31	13.00	-44.2%	16.01	-31.3%	14.51	-37.8%
Época Seca	14.12	6.44	-54.4%	7.48	-47.1%	6.96	-50.7%

Tabela 59 – Médias Mensais da Vazão Estimada C-3 (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	Histórico (m³/s)	1ª Metade (m³/s)		2ª Metade (m³/s)		Total (m³/s)	
Janeiro	29.28	20.31	-30.6%	22.67	-22.6%	21.49	-26.6%
Fevereiro	24.85	21.95	-11.7%	22.26	-10.4%	22.10	-11.0%
Março	22.24	11.14	-49.9%	11.55	-48.1%	11.34	-49.0%
Abril	16.92	7.27	-57.0%	9.69	-42.7%	8.48	-49.9%
Mai	13.96	8.55	-38.7%	12.31	-11.8%	10.43	-25.3%
Junho	14.12	7.46	-47.2%	14.69	4.0%	11.07	-21.6%
Julho	14.45	5.21	-63.9%	6.39	-55.8%	5.80	-59.8%
Agosto	11.16	5.31	-52.4%	3.52	-68.5%	4.41	-60.5%
Setembro	18.24	8.16	-55.3%	7.10	-61.1%	7.63	-58.2%
Outubro	21.38	9.30	-56.5%	10.29	-51.9%	9.79	-54.2%
Novembro	23.99	8.91	-62.9%	15.18	-36.7%	12.04	-49.8%
Dezembro	23.22	12.10	-47.9%	18.31	-21.2%	15.21	-34.5%
Ano. Hid. Comp.	19.48	10.47	-46.2%	12.83	-34.2%	11.65	-41.7%
Época Úmida	23.31	13.12	-43.7%	15.34	-34.2%	14.23	-39.0%
Época Seca	14.12	6.76	-52.1%	9.32	-34.0%	8.04	-43.1%

APÊNDICE G – COMPARAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO MENSAL MÉDIA C-2 VS. C-3

Tabela 60 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.
Janeiro	148.3	143.7	-3.1%	151.5	146.8	-3.1%	149.9	145.2	-3.1%
Fevereiro	122.8	119.5	-2.7%	128.5	125.0	-2.8%	125.7	122.2	-2.7%
Março	115.3	114.9	-0.4%	118.1	118.1	0.0%	116.7	116.5	-0.2%
Abril	86.1	86.7	0.6%	87.0	87.3	0.4%	86.5	87.0	0.5%
Mai	68.5	66.8	-2.5%	66.4	64.6	-2.6%	67.4	65.7	-2.6%
Junho	55.0	53.4	-2.9%	52.8	51.0	-3.5%	53.9	52.2	-3.2%
Julho	61.0	59.0	-3.2%	54.6	52.9	-3.2%	57.8	55.9	-3.2%
Agosto	70.7	68.6	-3.0%	67.5	65.3	-3.2%	69.1	67.0	-3.1%
Setembro	89.3	87.3	-2.3%	86.1	84.1	-2.3%	87.7	85.7	-2.3%
Outubro	111.9	108.7	-2.9%	111.6	108.5	-2.8%	111.8	108.6	-2.8%
Novembro	125.1	121.6	-2.8%	128.1	124.3	-3.0%	126.6	123.0	-2.9%
Dezembro	140.9	136.5	-3.1%	144.8	140.5	-3.0%	142.8	138.5	-3.0%
Ano. Hid. Comp.	99.6	97.2	-2.4%	99.7	97.3	-2.4%	99.7	97.3	-2.4%
Época Úmida	122.0	118.9	-2.5%	124.1	121.0	-2.5%	123.0	120.0	-2.5%
Época Seca	68.3	66.9	-2.0%	65.6	64.2	-2.2%	67.0	65.6	-2.1%

Tabela 61 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 4,5)

GCM4 - RCP 4.5	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.
Janeiro	144.5	140.2	-3.0%	145.0	140.7	-2.9%	144.7	140.5	-3.0%
Fevereiro	118.8	115.7	-2.6%	123.0	119.5	-2.8%	120.9	117.6	-2.7%
Março	115.2	114.8	-0.3%	117.5	117.5	0.0%	116.3	116.2	-0.2%
Abril	84.1	84.6	0.7%	83.5	83.6	0.1%	83.8	84.1	0.4%
Mai	65.1	63.6	-2.3%	67.2	65.1	-3.1%	66.1	64.3	-2.7%
Junho	51.9	50.4	-2.8%	52.2	50.8	-2.8%	52.0	50.6	-2.8%
Julho	57.4	55.4	-3.4%	56.4	54.6	-3.2%	56.9	55.0	-3.3%
Agosto	68.0	65.9	-3.1%	66.5	64.6	-2.9%	67.3	65.2	-3.0%
Setembro	85.0	82.8	-2.5%	84.6	82.9	-2.1%	84.8	82.9	-2.3%
Outubro	109.2	106.2	-2.8%	108.1	104.9	-2.9%	108.7	105.6	-2.8%
Novembro	122.6	119.1	-2.9%	124.2	120.8	-2.8%	123.4	119.9	-2.8%
Dezembro	137.6	133.5	-3.0%	137.3	133.2	-3.0%	137.4	133.3	-3.0%
Ano. Hid. Comp.	96.6	94.4	-2.3%	97.1	94.8	-2.3%	96.9	94.6	-2.3%
Época Úmida	119.0	116.0	-2.5%	119.9	117.1	-2.4%	119.5	116.6	-2.4%
Época Seca	65.3	64.0	-2.0%	65.2	63.7	-2.2%	65.2	63.9	-2.1%

Tabela 62 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.
Janeiro	148.1	143.5	-3.1%	147.9	143.5	-3.0%	148.0	143.5	-3.1%
Fevereiro	125.8	122.1	-2.9%	124.2	120.6	-2.9%	125.0	121.4	-2.9%
Março	113.9	113.7	-0.2%	112.5	112.6	0.1%	113.2	113.2	0.0%
Abril	85.6	86.1	0.6%	84.1	84.3	0.3%	84.9	85.2	0.4%
Maio	66.5	65.1	-2.2%	65.5	63.5	-2.9%	66.0	64.3	-2.5%
Junho	56.1	54.3	-3.2%	51.4	49.9	-2.9%	53.7	52.1	-3.0%
Julho	57.0	55.3	-3.0%	57.4	55.5	-3.2%	57.2	55.4	-3.1%
Agosto	72.7	70.3	-3.3%	68.9	66.9	-3.0%	70.8	68.6	-3.1%
Setembro	86.5	84.4	-2.4%	86.4	84.5	-2.2%	86.5	84.5	-2.3%
Outubro	110.7	107.5	-2.9%	107.6	104.8	-2.6%	109.1	106.1	-2.7%
Novembro	127.1	123.3	-3.0%	127.2	123.5	-2.9%	127.1	123.4	-2.9%
Dezembro	141.3	136.9	-3.1%	140.5	136.4	-2.9%	140.9	136.6	-3.0%
Ano. Hid. Comp.	99.3	96.9	-2.4%	97.8	95.5	-2.3%	98.5	96.2	-2.4%
Época Úmida	121.9	118.8	-2.6%	120.9	118.0	-2.4%	121.4	118.4	-2.5%
Época Seca	67.6	66.2	-2.0%	65.4	64.0	-2.2%	66.5	65.1	-2.1%

Tabela 63 – Comparação da Evapotranspiração Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.	S.A. (mm)	S.F. (mm)	Var.
Janeiro	150.5	146.0	-3.0%	155.3	150.3	-3.2%	152.9	148.2	-3.1%
Fevereiro	123.5	120.2	-2.7%	132.1	128.4	-2.8%	127.8	124.3	-2.8%
Março	116.5	115.7	-0.7%	121.6	121.9	0.2%	119.0	118.8	-0.2%
Abril	87.2	88.1	1.0%	88.3	88.2	-0.1%	87.8	88.1	0.4%
Mai	69.3	68.2	-1.6%	66.6	64.8	-2.7%	68.0	66.5	-2.1%
Junho	57.4	55.6	-3.1%	53.8	52.3	-2.7%	55.6	53.9	-2.9%
Julho	62.9	60.6	-3.6%	58.7	56.9	-3.1%	60.8	58.8	-3.3%
Agosto	66.7	64.7	-3.0%	64.0	62.4	-2.5%	65.3	63.5	-2.7%
Setembro	87.3	85.0	-2.6%	85.3	83.4	-2.2%	86.3	84.2	-2.4%
Outubro	114.9	111.8	-2.7%	117.1	113.7	-2.9%	116.0	112.7	-2.8%
Novembro	128.6	124.8	-2.9%	134.1	130.6	-2.6%	131.3	127.7	-2.8%
Dezembro	142.8	138.6	-3.0%	151.8	147.2	-3.1%	147.3	142.9	-3.0%
Ano. Hid. Comp.	100.6	98.3	-2.3%	102.4	100.0	-2.3%	101.5	99.1	-2.3%
Época Úmida	123.4	120.3	-2.5%	128.2	125.1	-2.4%	125.8	122.7	-2.5%
Época Seca	68.7	67.4	-1.8%	66.3	64.9	-2.0%	67.5	66.2	-1.9%

APÊNDICE H – COMPARAÇÃO DA VAZÃO MENSAL MÉDIA C-2 VS. C-3

Tabela 64 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 2.6)

GCM4 - RCP 2.6	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.
Janeiro	17.2	17.8	3.6%	21.8	22.4	2.8%	19.5	20.1	3.2%
Fevereiro	24.2	24.7	1.9%	24.1	24.6	2.1%	24.2	24.7	2.0%
Março	12.1	12.3	1.6%	15.0	15.1	1.2%	13.5	13.7	1.4%
Abril	8.1	8.0	-0.1%	7.4	7.4	-0.2%	7.7	7.7	-0.2%
Maio	5.9	6.0	1.1%	8.1	8.1	0.8%	7.0	7.1	0.9%
Junho	7.5	7.7	2.2%	6.0	6.1	2.3%	6.7	6.9	2.2%
Julho	5.4	5.6	3.1%	3.0	3.2	5.5%	4.2	4.4	4.0%
Agosto	6.4	6.6	3.2%	3.9	4.1	5.4%	5.1	5.3	4.0%
Setembro	9.4	9.8	3.8%	8.9	9.3	4.5%	9.1	9.5	4.1%
Outubro	9.1	9.5	4.1%	10.1	10.5	3.8%	9.6	10.0	4.0%
Novembro	8.7	9.2	5.5%	7.6	8.0	6.1%	8.1	8.6	5.8%
Dezembro	12.6	13.1	4.3%	13.1	13.7	4.3%	12.9	13.4	4.3%
Ano. Hid. Comp.	10.6	10.9	2.9%	10.7	11.0	2.9%	10.6	11.0	2.9%
Época Úmida	13.3	13.8	3.2%	14.4	14.8	3.1%	13.8	14.3	3.2%
Época Seca	6.7	6.8	1.8%	5.7	5.8	2.0%	6.2	6.3	1.9%

Tabela 65 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 4.5)

GCM4 - RCP 4.5	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.
Janeiro	20.2	20.7	2.9%	22.3	22.8	2.5%	21.2	21.8	2.7%
Fevereiro	25.0	25.4	1.8%	21.0	21.5	2.4%	23.0	23.4	2.1%
Março	12.6	12.8	1.4%	13.4	13.6	1.2%	13.0	13.2	1.3%
Abril	8.2	8.1	-0.2%	8.5	8.5	-0.1%	8.3	8.3	-0.2%
Maio	7.1	7.2	0.7%	7.7	7.8	1.1%	7.4	7.5	0.9%
Junho	11.5	11.6	1.5%	7.9	8.0	1.9%	9.7	9.8	1.7%
Julho	5.3	5.4	2.4%	6.4	6.6	3.1%	5.8	6.0	2.8%
Agosto	5.6	5.8	3.7%	3.8	4.0	4.3%	4.7	4.9	3.9%
Setembro	10.0	10.3	3.6%	9.8	10.1	3.4%	9.9	10.2	3.5%
Outubro	10.6	11.0	3.7%	9.1	9.4	4.3%	9.8	10.2	4.0%
Novembro	9.2	9.6	4.8%	11.0	11.4	4.1%	10.1	10.5	4.4%
Dezembro	12.8	13.2	3.6%	13.2	13.7	3.9%	13.0	13.5	3.7%
Ano. Hid. Comp.	11.5	11.8	2.5%	11.2	11.5	2.6%	11.3	11.6	2.5%
Época Úmida	14.3	14.7	2.9%	14.2	14.6	2.9%	14.3	14.7	2.9%
Época Seca	7.5	7.6	1.4%	6.9	7.0	1.7%	7.2	7.3	1.6%

Tabela 66 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 6.0)

GCM4 - RCP 6.0	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.
Janeiro	20.5	21.1	2.7%	25.7	26.3	2.3%	23.1	23.7	2.5%
Fevereiro	17.6	18.1	2.7%	26.4	26.8	1.7%	22.0	22.5	2.1%
Março	9.5	9.7	2.1%	11.3	11.4	1.0%	10.4	10.5	1.5%
Abril	7.9	7.9	-0.2%	8.6	8.6	0.0%	8.3	8.2	-0.1%
Mai	7.9	8.0	1.2%	7.4	7.5	1.1%	7.7	7.8	1.2%
Junho	4.8	4.9	2.6%	11.0	11.2	1.7%	7.9	8.1	2.0%
Julho	6.6	6.8	2.8%	5.1	5.3	2.9%	5.9	6.0	2.8%
Agosto	4.4	4.6	5.5%	4.5	4.8	5.4%	4.5	4.7	5.4%
Setembro	8.9	9.3	4.0%	9.3	9.6	3.3%	9.1	9.5	3.7%
Outubro	11.6	12.0	3.9%	12.3	12.6	3.1%	11.9	12.3	3.5%
Novembro	8.4	8.8	4.9%	10.5	10.9	4.5%	9.4	9.9	4.7%
Dezembro	11.4	12.0	5.1%	13.8	14.3	3.9%	12.6	13.2	4.4%
Ano. Hid. Comp.	10.0	10.3	3.0%	12.2	12.5	2.4%	11.1	11.4	2.7%
Época Úmida	12.6	13.0	3.4%	15.6	16.0	2.6%	14.1	14.5	3.0%
Época Seca	6.3	6.4	2.0%	7.3	7.5	1.8%	6.8	7.0	1.9%

Tabela 67 – Comparação da Vazão Mensal Média C-2 vs. C-3 (RCP 8.5)

GCM4 - RCP 8.5	1ª Metade			2ª Metade			Total		
	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.	S.A. (m³/s)	S.F. (m³/s)	Var.
Janeiro	19.7	20.3	3.3%	22.0	22.7	2.9%	20.8	21.5	3.1%
Fevereiro	21.5	22.0	2.1%	21.8	22.3	2.0%	21.7	22.1	2.1%
Março	10.9	11.1	1.9%	11.4	11.5	1.6%	11.2	11.3	1.7%
Abril	7.3	7.3	0.1%	9.7	9.7	-0.3%	8.5	8.5	-0.1%
Maio	8.5	8.6	0.7%	12.2	12.3	0.8%	10.4	10.4	0.7%
Junho	7.3	7.5	2.0%	14.5	14.7	1.4%	10.9	11.1	1.6%
Julho	5.1	5.2	3.1%	6.3	6.4	1.6%	5.7	5.8	2.3%
Agosto	5.1	5.3	4.0%	3.4	3.5	4.6%	4.2	4.4	4.2%
Setembro	7.9	8.2	3.8%	6.8	7.1	3.8%	7.4	7.6	3.8%
Outubro	8.8	9.3	5.1%	9.9	10.3	4.5%	9.3	9.8	4.8%
Novembro	8.4	8.9	5.7%	14.6	15.2	3.6%	11.5	12.0	4.4%
Dezembro	11.6	12.1	4.5%	17.7	18.3	3.3%	14.7	15.2	3.8%
Ano. Hid. Comp.	10.2	10.5	3.0%	12.5	12.8	2.4%	11.3	11.7	2.7%
Época Úmida	12.7	13.1	3.4%	14.9	15.3	3.0%	13.8	14.2	3.2%
Época Seca	6.6	6.8	1.7%	9.2	9.3	1.1%	7.9	8.0	1.4%

APÊNDICE I – PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Tabela 68 – Principais Resultados Obtidos

C-1: Apenas Alteração do Uso e Ocupação do Solo S.A. vs. S.F.			
	Ano Hidrológico completo	Época Úmida	Época Seca
Evapotranspiração	Sem Variação	Sem Variação	Sem Variação
Vazão	Sem Variação	Sem Variação	Aumento
C-2: Apenas Mudança Climática S.H. vs. GCM4			
Etapa 1			
Precipitação	S.H. > GCM4	S.H. > GCM4, salvo RCP 4.5	S.H. > GCM4
Temperatura	S.H. < GCM4	S.H. < GCM4	S.H. < GCM4
Evapotranspiração	S.H. < GCM4	S.H. < GCM4	S.H. < GCM4
Vazão	S.H. > GCM4	S.H. > GCM4	S.H. > GCM4
Etapa 2 (1ª Metade -> 2ª Metade da Simulação)			
Precipitação	Aumento do RCP 8.5	Aumento do RCP 6.0 e 8.5	Aumento do RCP 8.5
Temperatura	Aumento do RCP 4.5, 6.0 e 8.5	Aumento do RCP 4.5, 6.0 e 8.5	Aumento do RCP 4.5, 6.0 e 8.5
Evapotranspiração	Redução do RCP 6.0	Aumento do RCP 8.5	Sem Variação
Vazão	Aumento do RCP 6.0 e 8.5	Aumento do RCP 6.0 e 8.5	Sem Variação
C-2 vs. C-3: Efeito da Alteração de UOS no Período Simulado			
Evapotranspiração	Redução	Redução	Redução
Vazão	Aumento	Aumento	Aumento

ANEXO A – RELATÓRIO TÉCNICO 55

Tabela 69 – CN2 para Áreas Urbanas

CN2 para Áreas Urbanas					
Descrição da Cobertura		CN2 para o Grupo Hidrológico do Solo			
Tipo de Cobertura	Percentual Médio de Área Impermeável	A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desenvolvidas (vegetação estabelecida)					
Espaço aberto (gramados, parques, campos de golfe, cemitérios, etc.)					
Mau estado (cobertura de grama <50%)		68	79	86	89
Condições razoáveis (cobertura de grama 50% a 75%)		49	69	79	84
Bom estado (cobertura de grama > 75%)		39	61	74	80
Áreas impermeáveis:					
Estacionamento pavimentados, telhados, calçadas etc. (excluindo direito de passagem)		98	98	98	98
Ruas e estradas:					
Pavimentou; meios-fios e bueiros (excluindo direito de passagem)		98	98	98	98
Pavimentou; valas abertas (incluindo direito de passagem)		83	89	92	93
Cascalho (incluindo direito de passagem)		76	85	89	91
Sujeira (incluindo direito de passagem)		72	82	87	89
Áreas urbanas do deserto ocidental:					
Paisagismo natural do deserto (apenas áreas permeáveis)		63	77	85	88
Paisagismo artificial do deserto (barreira impermeável contra ervas daninhas, arbusto do deserto com areia de 1 a 2 polegadas ou cobertura de cascalho e bordas da bacia)		96	96	96	96
Distritos urbanos:					
Comercial e empresarial	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Distritos residenciais por tamanho médio de lote:					
500 m ² ou menos	65	77	85	90	92
1000 m ²	38	61	75	83	87
1500 m ²	30	57	72	81	86
2000 m ²	25	54	70	80	85
4000 m ²	20	51	68	79	84
8000 m ²	12	46	65	77	82
Áreas Urbanas em Desenvolvimento					
Áreas recentemente graduadas (apenas áreas permeáveis, sem vegetação)		77	86	91	94

Fonte: Conservation Engineering Division (1986).

Tabela 70 – CN2 para de Agriculturas Cultivadas

CN2 para Áreas de Agriculturas Cultivadas						
Descrição da Cobertura		Percentual Médio de Área Impermeável				
Tipo de Cobertura	Tratamento	Condições Hidrológicas	A	B	C	D
Pousio	Solo Exposto	-	77	86	91	94
	Cobertura de resíduo de colheita (CR)	Ruim	76	85	90	93
		Boa	74	83	88	90
Colheitas em Linha	Fileira Reta (FR)	Ruim	72	81	88	91
		Boa	67	78	85	89
	FR + CR	Ruim	71	80	87	90
		Boa	64	75	82	85
	Contornada (C)	Ruim	70	79	84	88
		Boa	65	75	82	86
	C + CR	Ruim	69	78	83	87
		Boa	64	74	81	85
	Contornado e com terraço (CT)	Ruim	66	74	80	82
		Boa	62	71	78	81
	CT + CR	Ruim	65	73	79	81
		Boa	61	70	77	80
Grão Pequeno	FR	Ruim	65	76	84	88
		Boa	63	75	83	87
	FR + CR	Ruim	64	75	83	86
		Boa	60	72	80	84
	C	Ruim	63	74	82	85
		Boa	61	73	81	84
	C + CR	Ruim	62	73	81	84
		Boa	60	72	80	83
	CT	Ruim	61	72	79	82
		Boa	59	70	78	81
	CT + CR	Ruim	60	71	78	81
		Boa	58	69	77	80
Prado de rotação de leguminosas com sementes próximas ou semeadas	FR	Ruim	66	77	85	89
		Boa	58	72	81	85
		Ruim	64	75	83	85
	C	Boa	55	69	78	83
		Ruim	63	73	80	83
		Boa	51	67	76	80
	CT					

A condição hidráulica é baseada na combinação de fatores que afetam a infiltração e o escoamento, incluindo (a) densidade e dossel de áreas vegetativas, (b) quantidade de cobertura durante todo o ano, (c) quantidade de grama ou leguminosas com sementes próximas, (d) porcentagem de cobertura de resíduos na superfície da terra (bom $\geq 20\%$), e (e) grau de rugosidade da superfície.

Ruim: Fatores prejudicam a infiltração e tendem a aumentar o escoamento.

Boa: Os fatores encorajam a infiltração média e melhor do que a média e tendem a diminuir o escoamento.

Fonte: *Conservation Engineering Division* (1986).

Tabela 71 – CN2 para Outras Áreas de Agricultura

CN2 para Outras Áreas de Agricultura					
Descrição da Cobertura		CN2 para o Grupo Hidrológico do Solo			
Tipo de Cobertura	Condições Hidrológicas	A	B	C	D
Pastagem, pastagem ou área - forragem contínua para pastagem ¹	Ruim	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
Prado - grama contínua, protegida do pasto e geralmente cortada para obtenção de feno.	-	30	58	71	78
Matagal - mistura de mato-erva daninha com matagal como elemento principal ²	Ruim	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Boa	30	48	65	73
Floresta - combinação de grama (pomar ou fazenda de árvores) ³	Ruim	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Boa	32	58	72	79
Floresta ⁴	Ruim	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Boa	30	55	70	77
Fazendas - prédios, pistas, calçadas e lotes circundantes	-	59	74	82	86

²) Ruim: <50%) cobertura do solo ou muito pastada sem cobertura morta; Média: 50 a 75% de cobertura do solo e não muito pastado; Boa: > 75% de cobertura do solo e levemente ou apenas ocasionalmente pastado.

³) Ruim: <50% de cobertura do solo; Regular: 50 a 75% de cobertura do solo; Boa: > 75% de cobertura do solo.

⁴) Ruim: Resíduos da floresta, pequenas árvores e arbustos são destruídos pelo pastoreio pesado ou queimadas regulares; Regular: Florestas são pastadas, mas não queimadas, e alguns resíduos da floresta cobrem o solo; Boa: Florestas são protegidas do pasto e a serapilheira e os arbustos cobrem o solo de maneira adequada.

Fonte: *Conservation Engineering Division* (1986).

Tabela 72 – CN2 para Regiões Áridas e Semiáridas

CN2 para Regiões Áridas e Semiáridas					
Descrição da Cobertura		CN2 para o Grupo Hidrológico do Solo			
Tipo de Cobertura	Condições Hidrológicas	A	B	C	D
Herbáceo - mistura de grama, ervas daninhas e arbustos de baixo crescimento, com o matagal como elemento secundário	Ruim			80	87
	Regular			71	81
	Boa			62	74
Carvalho-álamo - mistura de pincel de carvalho, álamo, mogno da montanha, arbusto amargo, bordo e outros tipos de matagal.	Ruim			66	74
	Regular			48	57
	Boa			30	41
Pinyon-zimbro - pinyon, zimbro ou ambos; grama sub-bosque	Ruim			75	85
	Regular			58	73
	Boa			41	61
Artemisia com sub-bosque de grama	Ruim			67	80
	Regular			51	63
	Boa			35	47
Arbusto do deserto - as principais plantas incluem erva-sal, madeira de graxa, chaparral, palo verde, algaroba e cacto	Ruim	63	77	85	88
	Regular	55	72	81	86
	Boa	49	68	79	84
Ruim: <30% de cobertura do solo (serapilheira, grama e vegetação rasteira).					
Regular: 30 a 70% de cobertura do solo.					
Boa: 70% de cobertura do solo.					

Fonte: *Conservation Engineering Division* (1986).