

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



RAFAEL DOS SANTOS MATIAS

**Projeção de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco
sob 9 cenários de mudanças climáticas SSP-RCP**

Maceió
2022

RAFAEL DOS SANTOS MATIAS

**Projeção de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco
sob 9 cenários de mudanças climáticas SSP-RCP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior

Maceió
2022

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária Responsável: Cláudio César Temóteo Galvino – CRB4/1459

M433p Matias, Rafael dos Santos.
 Projeção de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco sob 9 cenários de mudanças climáticas SSP-RCP / Rafael dos Santos Matias. – 2022.
 67 f.: il.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 60-67.

1. Rio São Francisco. 2. Modelagem hidrológica. 3. Disponibilidade hídrica. 4. Mudanças climáticas. 5. Cenários. I. Título.

CDU: 556.18:551.58



Folha de Aprovação

RAFAEL DOS SANTOS MATIAS

PROJEÇÃO DE VAZÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO SOB 9 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SSP-RCP

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Em: 31 /03 /2022

Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior
(Orientador - PPGRHS/ CTEC/UFAL)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves
(Examinador Interno – PPGRHS/ CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza
(Examinador Interno – PPGRHS/ CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz
(Examinador Externo à Instituição – UFPB)

RESUMO

Os cenários são ferramentas que ajudam a entender consequências de longo prazo e a tomar decisões de curto prazo, assim como permitem que pesquisadores explorem possíveis realidades diferentes. Os planos de recursos hídricos têm feito uso deles, sem seguir uma padronização, mas caminhando por uma ideia central de maior ou menor disponibilidade de água, ou mantendo os padrões atuais de demanda e disponibilidade. Sabe-se que mudanças no uso e cobertura do solo podem aumentar ou reduzir esta disponibilidade. Entre as técnicas utilizadas para mensurar essa influência, a modelagem hidrológica se apresenta como uma ferramenta eficaz.

Neste contexto, foram produzidas projeções de vazão sob os cenários SSP (*Shared Socioeconomics Pathways*), que contêm cinco possíveis tendências de desenvolvimento sociais, econômicas, ambientais e tecnológicas, associados aos cenários RCP (*Representative Concentrations Pathways*), utilizados pela comunidade científica para avaliar mudanças climáticas, na bacia hidrográfica do rio São Francisco através da simulação hidrológica realizada pelo Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH). Dados com projeções de uso e cobertura do solo de acordo com as narrativas das associações SSP-RCP de 2015 a 2100, e projeções de precipitação de acordo com os cenários RCP 2.6 e 4.5 foram utilizados como interface entre os cenários e o MGB-IPH. A eficiência da simulação foi avaliada pelos Coeficiente de Nash e Sutcliffe (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

O cenário de menor disponibilidade de água nos rios foi o SSP2-RCP2.6, representativo da tendência atual, com aumento da Q_{90} de 2,6%, isto é, de 51,19 m³/s para 52,54 m³/s. O cenário de maior disponibilidade foi o SSP4-RCP4.5, com aumento da Q_{90} de 16 %, isto é, de 51,19 m³/s para 59,39 m³/s. Ficou evidente que nos cenários de maior degradação ambiental, houve uma menor disponibilidade hídrica e nos cenários que tendem ao bom gerenciamento dos sistemas ambientais, a disponibilidade foi maior.

Palavras-chave: Rio São Francisco, Modelagem Hidrológica, Disponibilidade Hídrica, Mudanças Climáticas, Cenários.

ABSTRACT

Scenarios are tools that help to understand long-term consequences and make short-term decisions. They also allow researchers to explore possible different realities. Although hydric resources plans have been using them without attending a standard a central ideal is observed in respect of bigger or smaller water availability or keeping the same behavior of demand. It is known that land use and cover changes may increase or decrease water availability. Between the techniques applied to measure this influence the hydrological modelling shows itself as an efficient tool.

In this context flow projections were produced under the SSP (Shared Socioeconomic Pathways) scenarios which contain five possible social, economic, environmental, and technological development tendencies associated with the RCP (Representative Concentration Pathways) scenarios, commonly used by the scientific community to evaluate climatic changes. The hydrological model MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) developed by the Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) from the federal university of Rio Grande do Sul were applied at the São Francisco River basin. Projections of land use and cover produced under the SSP-RCP association from 2015 to 2100 and precipitation projections under the 2.6 and 4.5 RCP scenarios were used as links between the studied scenarios and the MGB-IPH. The simulation efficiency was evaluated by the Nash and Sutcliffe Coefficient (R^2) and Root Mean Square Error (RMSE).

The smaller water availability scenario was the SSP2-RCP2.6 which represents the current behavior with a 2,6% Q90 increase. The bigger water availability scenario was the SSP4-RCP4.5 with a Q90 increase of 16%. It is possible to conclude that in the scenarios where the environmental degradation was more expressive there was a smaller water availability and in the scenarios that consider good environmental systems management, the availability was bigger.

Key-Words: São Francisco River, Hydrological Modelling, Water Availability, Climatic Changes, Scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Caracterização da região hidrográfica São Francisco.....	13
Figura 3.2 – Usinas Hidrelétricas ao longo do Rio São Francisco	15
Figura 3.3 – Ciclo hidrológico na bacia hidrográfica.....	16
Figura 3.4 – Discretização da bacia em células quadradas e o conceito de URH.	20
Figura 3.5 – Mapa com os usos do solo representativos do cenário SSP1-RCP2.6 para o ano 2100.....	26
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de trabalho adotada	27
Figura 4.2 – Sub-bacias utilizadas para a calibração do modelo e hidrelétricas adotadas como pontos de controle.....	28
Figura 4.3 – Etapas para o uso do modelo MGB-IPH.	29
Figura 4.4 – Gráfico de Gantt	31
Figura 4.5 – Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para os cenários SSP1 RCP 2.6 e 4.5.	36
Figura 5.1 – Calibração do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Retiro Baixo.	40
Figura 5.2 – Validação do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Retiro Baixo	40
Figura 5.3 – Calibração do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Sobradinho.....	41
Figura 5.4 – Validação do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Sobradinho.....	41
Figura 5.5 – Calibração do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Itaparica.	41
Figura 5.6 – Validação do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Itaparica.....	42
Figura 5.7 – Hidrograma da simulação do cenário RCP2.6-SSP1 para o ponto de controle em Retiro Baixo.....	45
Figura 5.8 – Hidrograma da simulação do cenário RCP2.6-SSP1 para o ponto de controle em Sobradinho.	45
Figura 5.9 – Hidrograma da simulação do cenário RCP2.6-SSP1 para o ponto de controle em Itaparica.	46
Figura 5.10 – Gráficos de mudança, por cenário, na área dos usos da bacia	48

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 3.1 – Mudanças sobre uso e manejo do solo	17
Quadro 3.2 – Parâmetros do modelo MGB-IPH.....	20
Quadro 3.3 – Descrição dos cenários SSPs (<i>Shared Socio-economic Pathways</i>).	23
Quadro 3.4 – Usos do solo representativos dos cenários SSP-RCP identificados na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	25
Quadro 4.2 – Simplificação dos dados de Tipo do Solo	33
Quadro 4.3 – Simplificação dos dados de Uso do Solo de Chen <i>et al.</i> (2020).....	34
Quadro 5.1 – Parâmetros de Solo adotados para as URH da sub-bacia localizada no submédio São Francisco.	42
Quadro 5.2 – Parâmetros de Solo adotados para as URH da sub-bacia localizada no médio São Francisco.	42
Quadro 5.3 – Parâmetros de Solo adotados para as URH da sub-bacia localizada no alto São Francisco.	43
Quadro 5.4 – Parâmetros de Vegetação	44
Quadro 5.5 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP1-RCP2.6 e SSP1-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.	51
Quadro 5.6 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP2-RCP2.6 e SSP2-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.	51
Quadro 5.7 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP3-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.	52
Quadro 5.8 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP4-RCP2.6 e SSP4-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.	52
Quadro 5.9 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP5-RCP2.6 e SSP5-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.	53
Quadro 5.10 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP1-RCP2.6 e SSP1-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.....	53

Quadro 5.11 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP2-RCP2.6 e SSP2-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.....	54
Quadro 5.12 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP3-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.	54
Quadro 5.13 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP4-RCP2.6 e SSP4-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.....	54
Quadro 5.14 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP5-RCP2.6 e SSP5-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.....	55
Quadro 5.15 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP1-RCP2.6 e SSP1-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.....	55
Quadro 5.16 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP2-RCP2.6 e SSP2-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.....	56
Quadro 5.17 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP3-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.	56
Quadro 5.18 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP4-RCP2.6 e SSP4-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.....	56
Quadro 5.19 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP5-RCP2.6 e SSP5-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.....	57
Tabela 4.1 – Unidades de Resposta Hidrológica (URH).	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	A Bacia hidrográfica do rio São Francisco	12
3.2	Cobertura do solo e a dinâmica hidrológica nas bacias hidrográficas	16
3.3	Modelagem hidrológica	18
3.3.1	Conceituação	18
3.3.2	Calibração e validação	19
3.3.3	Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)	19
3.4	Cenários de mudanças ambientais, econômicas e sociais	21
3.5	Banco de Dados de Uso e Cobertura do Solo dos cenários SSP-RCP	25
4	METODOLOGIA	27
4.1	Dados de entrada do MGB	28
4.2	Calibração e Validação	30
4.3	Criação e Simplificação das URHs e dos Tipo do Solo	33
4.4	Projeção de vazão para 2050 e 2100	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1	Calibração e Validação	39
5.2	Teste de aplicabilidade dos dados de uso e ocupação do solo provenientes do modelo Demeter	44
5.3	Efeitos dos cenários na Precipitação	46
5.4	Efeitos dos cenários no uso e ocupação do solo	47
5.5	Projeções de vazão para 2050 e 2100	51
6	CONCLUSÕES	59

1 INTRODUÇÃO

O uso de cenários é uma abordagem que pode ser bastante eficiente para lidar com incertezas devido a condições meteorológicas, econômicas, sociais, entre outras (DONG e VAN de GIESEN, 2011). Estes aspectos influenciam diretamente as interações entre ser humano e meio ambiente, modificando condições como uso e cobertura do solo (UCS), entre outras. É fato conhecido na literatura que alterações no UCS podem modificar os mecanismos de transferência de chuva para escoamento alterando características hidrológicas do ecossistema como infiltração, evapotranspiração e capacidade de recarga do solo (LI *et al*, 2018; WOLDESENBET, 2016). Bacias mais conservadas, com uma presença mais representativa de florestas tendem a apresentar uma menor vazão específica de pico, bem como maior permanência da vazão na recessão (ALBUQUERQUE, 2010). Isto faz com que a cobertura do solo seja um fator a se considerar na análise de risco de alagamentos, bem como no estudo de disponibilidade hídrica.

Em geral, o mapeamento do uso e cobertura do solo se dá pela aplicação de técnicas supervisionadas ou não em imagens de satélite, enquanto a estimativa das condições futuras pode se dar por meio de cenários. A necessidade de a comunidade científica realizar avaliações sob condições idênticas direcionou à criação de cenários RCP (Representative Concentration Pathways) (VAN VUUREN *et al*, 2011) e os SSPs (*Shared Socio-economic Pathways*) (RIAHI *et al.*, 2016). Os cenários SSP contêm cinco visões possíveis para o desenvolvimento socioeconômico futuro (SSP1 – *Sustentabilidade*; SSP2 – *Metade da estrada*; SSP3 – *Rivalidade regional - uma estrada rochosa*; SSP4 – *Desigualdade - uma estrada dividida*; SSP5 – *Desenvolvimento de combustíveis fósseis - Tomando a estrada*), incluindo tendências para a agricultura e uso do solo. Esta abordagem qualitativa é quantificada através de modelos de avaliação integrados (IAM – *Integrated Assessment Models*). Chen et al (2020) produziram um banco de dados em escala global contendo dados georreferenciados relativos às mudanças no UCS descritas de acordo com a associação entre os cenários SSP e RCP, com resolução de 0,05°.

De acordo com Aduah (2018), os impactos das mudanças no uso e cobertura do solo sobre a hidrologia têm sido avaliados ao longo das últimas décadas através de métodos estatísticos baseados em dados de campo adquiridos em estudos em única bacia ou em pares. Outra ferramenta que tem sido bastante utilizada na literatura para avaliar a relação entre a cobertura do solo e o ciclo hidrológico é a modelagem hidrológica (NÓBREGA, 2008;

VIEIRA, 2011; RODRIGUES, 2013; SANTOS, 2013; HASSABALLAH, 2017; OLIVEIRA, 2018; GARG, 2019; NETO *et al.*, 2021) que pode ser utilizada também para previsão de vazão e de cheias (SILVA *et al.*, 2007; GUIMARÃES, 2018), avaliação do efeito de mudanças climáticas na descarga fluvial (SORRIBAS *et al.*, 2016), modelagem em escala continental para a América do Sul (SIQUEIRA *et al.*, 2018), entre outras.

As mudanças no uso e cobertura do solo têm sido investigadas no Brasil em regiões específicas (ESPÍRITO-SANTO *et al.*, 2016), envolvendo parte da bacia hidrográfica do rio São Francisco, visando estritamente entender os padrões de alteração ou diretamente em uma unidade de planejamento desta bacia com finalidades como avaliar as suas consequências na produção de sedimentos (SILVA *et al.*, 2016), ou na dinâmica hidrológica (SILVA *et al.*, 2018). Observa-se, também, a ausência de trabalhos que apliquem os cenários SSP na bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Simular a disponibilidade hídrica sob diferentes cenários de mudança climática, um fenômeno cujas consequências já podem ser sentidas, é importante para a bacia do rio São Francisco, pois ela tem uma relevância considerável para o país em diversos setores econômicos, assim como para a produção de energia, pode cessar devido à baixa disponibilidade de água (JONG *et al.*, 2018). Assim, trabalhar com cenários pode ajudar a evitar esse e outros efeitos, mudando planejamento e execução imediatamente.

Neste contexto, foram realizadas projeções de vazão sob 9 cenários de mudanças climáticas SSP-RCP através da simulação hidrológica realizada pelo modelo MGB-IPH, utilizando dados de UCS representativos dos cenários.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é produzir projeções de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, de acordo com os cenários de mudanças climáticas Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSP, do inglês *Shared Socioeconomic Pathways*), através de simulações realizadas no modelo hidrológico MGB-IPH. Para tal, são enunciados os seguintes objetivos específicos:

- Adaptar os cenários de mudanças climáticas SSP-RCP, através do uso e cobertura do solo proveniente do modelo de desagregação Demeter, para a calibração do MGB;
- Analisar o impacto das mudanças do uso e cobertura do solo, estabelecidas nos cenários SSP, nas condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio São Francisco.
- Analisar projeções de vazão para os cenários SSP nos horizontes de 2050 e 2100.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A Bacia hidrográfica do rio São Francisco

A bacia, localizada entre as latitudes 7°17'S e 20°50'S e longitudes 36°15'O a 47°39'O, envolve uma área de 639.219 km² (8% do território nacional), abrange 503 Municípios, parte do Distrito Federal, e sete Unidades da Federação: Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Essa Região Hidrográfica está dividida em quatro regiões fisiográficas: São Francisco Alto; Médio; Sub-Médio e Baixo conforme a **Figura 3.1**.

- **Alto São Francisco:** Corresponde à região compreendida entre a nascente do rio principal, na serra da Canastra, Estado de Minas Gerais, e a confluência com o rio Jequitaiá, ainda no mesmo Estado. É uma região onde predomina o clima úmido, havendo trechos de clima sub-úmido úmido e sub-úmido seco, sendo, portanto, uma importante região geradora de vazões. Nesta região está localizado o reservatório da usina hidrelétrica de Três Marias e a UHE Queimado.
- **Médio São Francisco:** É o trecho de maior extensão, com 1.152 km, entre a confluência do rio Jequitaiá com o São Francisco e a barragem da usina hidrelétrica de Sobradinho, na divisa entre os Estados de Pernambuco e Bahia. Possui regiões de clima sub-úmido seco e semiárido. A vazão neste trecho sofre a influência da regularização causada pelo reservatório de Três Marias.
- **Submédio São Francisco:** Com 568 km, corresponde ao trecho entre a barragem de Sobradinho e a cidade de Belo Monte, em Alagoas. Caracteriza-se por ser uma região de clima árido a semiárido, pela vazão regularizada pelos reservatórios das usinas de Sobradinho e Itaparica e pela maior declividade do leito original do rio, o que resultou na construção de uma cascata de usinas hidrelétricas no trecho, que ainda é estudado para construção de novas usinas.
- **Baixo São Francisco:** Corresponde ao trecho a jusante de Belo Monte, até a foz no oceano Atlântico, na divisa dos Estados de Sergipe e Alagoas. Caracteriza-se por ser um trecho de rio encaixado e de vazões regularizadas pelos reservatórios das usinas de Sobradinho e Itaparica.

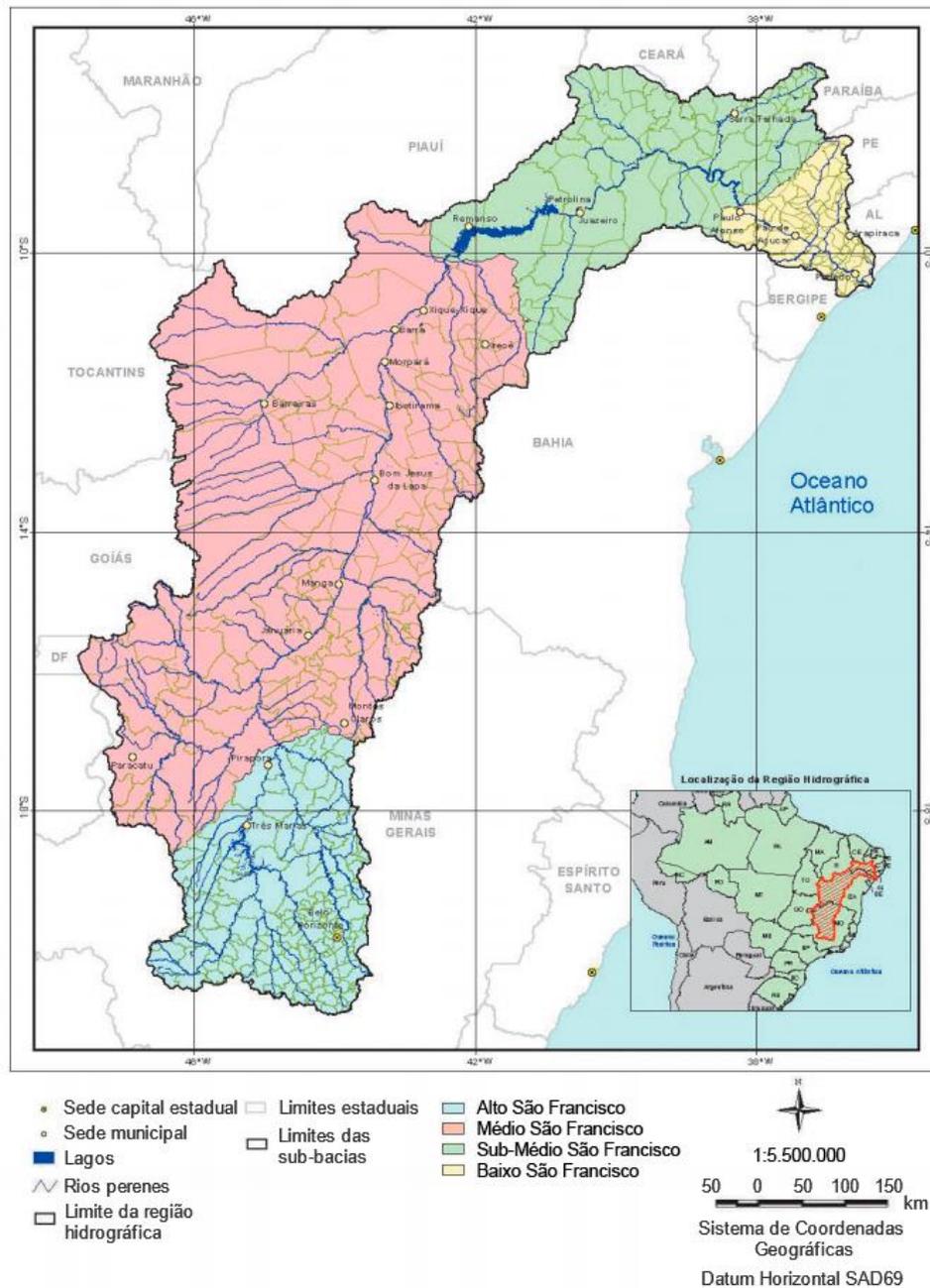


Figura 3.1 – Caracterização da região hidrográfica São Francisco

Fonte: MMA, 2006.

O extrativismo vegetal é observado na bacia de forma difusa para necessidades domésticas (lenha, madeira, fibras). O uso do solo predominante na bacia é a atividade agrossilvopastoril. As queimadas para sua expansão são comuns. Além do desmatamento, que é o principal impacto ambiental observado na bacia, são encontrados também impactos como erosão, salinização dos solos que leva à desertificação e subsidência cárstica (CBHSF, 2016).

O clima da região apresenta uma variabilidade de úmido para árido, com temperatura variando de 18 a 27°C e precipitação variando de 1.500 mm a 350 mm. Já a evapotranspiração média é de 896 mm/ano, variando entre 2.140 mm e 1300 mm (SILVA *et al.*, 2005).

O São Francisco tem 36 afluentes importantes, sendo 19 perenes, destacando-se, pela margem direita, os rios Pará, Paraopeba, Velhas e Verde Grande e, pela margem esquerda, os rios Abaeté, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Carinhanha, Corrente e Grande. As áreas de drenagem destes afluentes representam 46% da área da bacia, contribuindo com 81% da sua vazão (CBHSF, 2016).

A **Figura 3.2** apresenta as hidrelétricas instaladas na BHRSF. Observa-se que a capacidade instalada total é de aproximadamente 10.500 MW. O subsistema Nordeste, do SIN (Sistema Interligado Nacional), é atendido basicamente pelas usinas hidrelétricas situadas no rio São Francisco e em outras Bacias da região nordeste, por usinas térmicas; e por energia importada de outros subsistemas por meio de linhas de transmissão (MMA, 2006).

O efeito cumulativo de regularização nos reservatórios de uma cascata de aproveitamentos faz com que a última usina seja a mais beneficiada pela vazão regularizada em cada um dos outros reservatórios, ou seja, um percentual da sua energia gerada deve-se a vazão que foi regularizada em cada um dos outros reservatórios. Isso também proporciona uma valorização maior dessa energia, uma vez que pode ser gerada de forma contínua por longos períodos (maior "energia firme"). No rio São Francisco, a maior capacidade de regularização se encontra no reservatório de Sobradinho, seguida de Três Marias e Itaparica. Isso faz com que o complexo Paulo Afonso e a UHE Xingó sejam os grandes beneficiários da regularização (RAMINA, 2014). Segundo o autor, a operação dos reservatórios do SIN, incluindo as do rio São Francisco (**Figura 3.2**), segue as determinações do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), que a realiza procurando otimizar a geração de energia elétrica do SIN e simultaneamente atender os critérios de segurança e confiabilidade estabelecidos pela ANEEL.

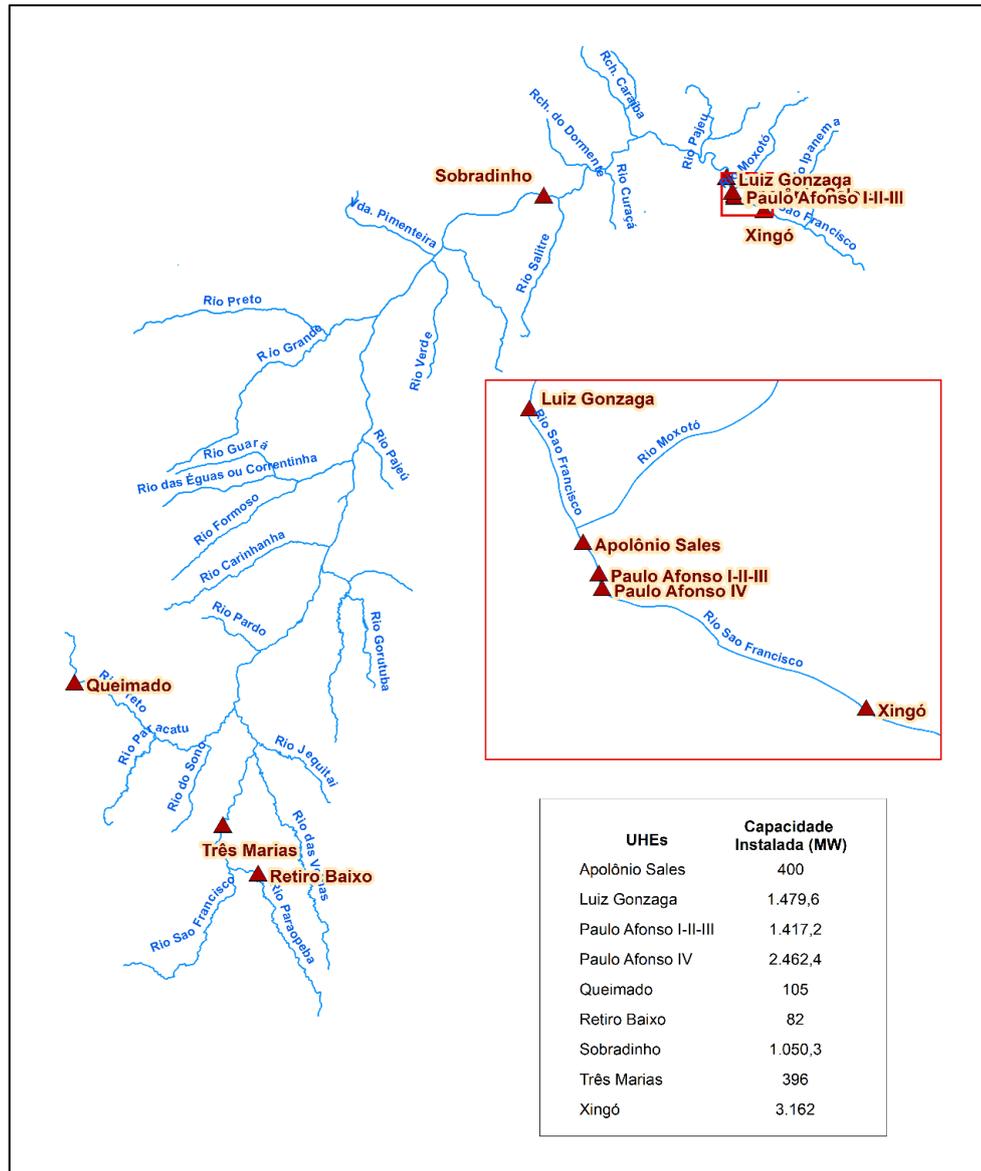


Figura 3.2 – Usinas Hidrelétricas ao longo do Rio São Francisco

Fonte: autor.

A produção de energia hidrelétrica na bacia pode ser diretamente afetada no contexto das mudanças climáticas, com uma redução de 60% de geração anual até 2030, segundo de Jong *et al.* (2018). O autor afirma que com esta redução, os usos mais importantes da bacia se tornarão abastecimento urbano e industrial e que para manter as emissões de carbono relativamente baixas devido à geração de energia, é necessário investir em energia eólica e solar. Embora tenha sido traçado este paralelo com a geração de energia na região, este trabalho foi realizado fazendo uso de vazões naturalizadas, isto é, considerando artificialmente que as hidrelétricas não existem, ficando a sugestão de uma aplicação em potencial de relevância considerável deste estudo.

3.2 Cobertura do solo e a dinâmica hidrológica nas bacias hidrográficas

Os processos hidrológicos nas bacias hidrográficas estão submetidos a dois fluxos predominantes: o vertical, que corresponde à precipitação e evapotranspiração; e o longitudinal, equivalente ao escoamento superficial e do subsolo. Estes processos estão diretamente relacionados à cobertura do solo. A retirada da cobertura vegetal aumenta a vazão média anual, sendo a intensidade deste aumento relacionada à extensão da área retirada (SAHIN e HALL, 1996). Este efeito independe da escala, podendo ser observado tanto em bacias de poucos hectares quanto em bacias como a do rio Araguaia com aproximadamente 82.600 km² (BOSCH e HEWLETT, 1982; COE et al, 2011).

A parcela inicial da precipitação é retida pela vegetação, de modo que quanto maior for a superfície de folhagem, ou Índice de Área Foliar (IAF), maior será a área de retenção da água, que é posteriormente evaporada. A parcela não interceptada pode escoar superficialmente de acordo com a capacidade de infiltração do solo (TUCCI e CLARKE, 1997), que depende fundamentalmente da água disponível, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar presentes em seu interior (TUCCI, 2001). A parte que infiltra pode percolar para o aquífero ou se tornar escoamento subsuperficial sendo transportada através dos canais internos até a superfície ou um curso d'água. A água que percola até o aquífero é armazenada e transportada até os rios, criando condições para mantê-los perenes nos períodos de longa estiagem (TUCCI e CLARKE, 1997). Este processo é descrito na **Figura 3.3**.

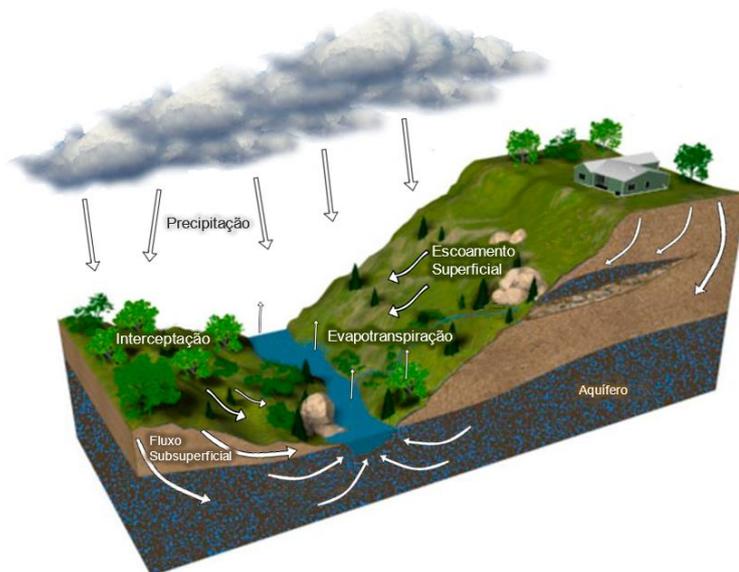


Figura 3.3 – Ciclo hidrológico na bacia hidrográfica

Fonte: Adaptado de UCAR, 2010.

As mudanças no uso e manejo do solo da bacia podem ser classificadas quanto ao tipo de alteração, ao uso da superfície ou à forma de desmatamento, como descrito no **Quadro 3.1**.

Quadro 3.1 – Mudanças sobre uso e manejo do solo

Classificação	Tipo
Mudança de superfície	Desmatamento
	Reflorestamento
	Impermeabilização
Uso da superfície	Urbanização
	Reflorestamento para exploração sistemática
	Desmatamento: extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas permanentes
Método de alteração	Queimada
	Manual
	Equipamentos

Fonte: TUCCI e CLARKE, 1997.

A modificação de florestas nativas para pastagens eleva o nível do lençol freático e aumenta a frequência e intensidade do escoamento superficial pela compactação do solo, reduzindo inclusive a sua condutividade hidráulica (GERMER *et al.*, 2010). Por outro lado, a urbanização aumenta as taxas de escoamento superficial ao passo que diminui o volume infiltrado e a recarga dos aquíferos, levando a uma redução acentuada no fluxo de base (TANG *et al.*, 2005). Tucci e Clarke (1997) e Bruijnzeel (1996) destacam acerca das mudanças de uso e cobertura do solo:

- As florestas absorvem mais radiação solar do que os outros tipos de cobertura vegetal, ou seja, a energia disponível para a evapotranspiração é maior em florestas;
- A interceptação em florestas é maior. Com isso a evaporação direta da água interceptada tende a ser maior;
- As florestas retiram do solo mais umidade do que as pastagens ou o solo nu;
- As condições de escoamento podem retornar às condições anteriores ao desmatamento após vários anos, se houver crescimento da vegetação; e
- Quando o solo, após o desmatamento, é utilizado para plantação permanente (café, chá, etc.), a modificação no escoamento é menor; no entanto, quando é utilizado para agricultura intensa, como culturas anuais, e a prática agrícola utiliza mecanização, a alteração do escoamento tende a ser permanente.

3.3 Modelagem hidrológica

3.3.1 Conceituação

A classificação dos modelos segue os critérios adotados para o sistema ao qual ele representa. Um modelo é dito *concentrado* quando não leva em conta a variabilidade espacial. Se as variáveis e parâmetros dele dependem do espaço e do tempo, é dito *distribuído*. Na prática, não existem modelos puramente distribuídos, já que são utilizadas discretizações numéricas que, de alguma forma, tornam o modelo concentrado numa pequena subdivisão. Somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema (TUCCI, 2005).

A escala adotada é função do objetivo que se tem na realização do trabalho. Modelos de pequena escala são utilizados para resolver problemas locais, como estimativa de cotas de inundação, estimativa de volumes necessários para a regularização de vazão, dimensionamento de canais e estimativa de vazões mínimas, variando de alguns quilômetros a centenas de quilômetros. Modelos de grande escala, surgiram como resposta à problemas e desafios acerca das mudanças climáticas, alterações de uso do solo e o desenvolvimento das técnicas de previsão de tempo e clima, suprimindo a carência existente entre os módulos de hidrologia superficial dos modelos de circulação global (COLLISCHONN, 2001).

Um sistema é dito *contínuo* quando os fenômenos são contínuos no tempo, enquanto que o sistema é *discreto* quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos (TUCCI, 2005), sendo a discretização espacial em sub-bacias a mais comum. Com relação à alimentação dos modelos, a maior fonte de dados, considerando a escala de grandes bacias, é o sensoriamento remoto. Normalmente utilizado para a classificação da cobertura vegetal e uso do solo, pode também fornecer dados como: umidade do solo, estimativas da evapotranspiração real, áreas inundadas, etc (COLLISCHONN, 2001). A necessidade da detecção e quantificação de mudanças na cobertura do solo em larga escala faz com que as imagens de satélite sejam fontes de dados mais econômicas, eficientes e confiáveis. Um número grande de estudos nessa área tem sido conduzido utilizando bancos de dados de sensoriamento remoto como MODIS (GARG *et al.*, 2017; NGUYEN *et al.*, 2018), e Landsat (PIELKE *et al.*, 2007; FENTA *et al.*, 2017; NGUYEN *et al.*, 2018; NÄSCHEN *et al.*, 2019; CHEN, 2020). Este último tem se tornado gradualmente a primeira escolha para as pesquisas sobre mudanças no uso e cobertura do solo devido ao seu acesso ser conveniente, ter longas séries temporais, alta resolução espacial, e acesso gratuito (LU *et al.*, 2019).

3.3.2 Calibração e validação

A modelagem pode ser descrita em etapas, que devem contemplar o objetivo específico do problema. A etapa em que se define os valores dos parâmetros do modelo de modo que ele assuma o comportamento de determinado conjunto de dados observados é denominada *Calibração*. Ela pode ser realizada pelos métodos de tentativa e erro ou pelo uso de algoritmos que façam o processo automaticamente utilizando funções objetivo que minimizem as diferenças entre os valores calculados e observados. O ajuste do modelo é analisado de forma quantitativa através destas funções objetivo, que recebem este nome por otimizarem o objetivo desejado.

Um dos produtos da simulação hidrológica é um hidrograma calculado pelo modelo, que é comparado com aquele observado a fim de aproximar o máximo possível os dois hidrogramas. As funções objetivo buscam medir a discrepância entre esses hidrogramas para que ela possa ser minimizada, sendo que algumas se ajustam melhor às vazões máximas, outras a vazões mínimas (TUCCI, 2005). Desta forma, a eficiência dos modelos também pode ser analisada fazendo uso das funções objetivo.

Na etapa seguinte, denominada *Validação*, a simulação ocorre em um período diferente do adotado na calibração a fim de analisar se os valores obtidos dos parâmetros continuam gerando resultados com uma boa eficiência, de acordo com as funções objetivo.

3.3.3 Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)

O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com foco em bacias sul americanas de grande escala considerando a baixa densidade espacial e duração limitada dos dados disponíveis na região. Neste modelo, o uso do solo, a topografia, a cobertura vegetal e os tipos de solo são utilizados como guia para selecionar os valores dos parâmetros. (COLLISCHONN, 2007).

A bacia de drenagem é dividida em elementos de área, sendo utilizada posteriormente a metodologia de Unidade de Resposta Hidrológica (URH). Cada uma das URHs é dividida em blocos, segundo o tipo de solo e de cobertura do solo (**Figura 3.4**). Esta divisão é feita considerando, em primeiro lugar, os pontos em que existem dados de vazão observados que podem permitir a calibração do modelo e, em segundo lugar, a altitude. O balanço vertical é

realizado nos blocos e o escoamento gerado é propagado no interior da URH até a rede de drenagem (COLLISCHONN, 2001).

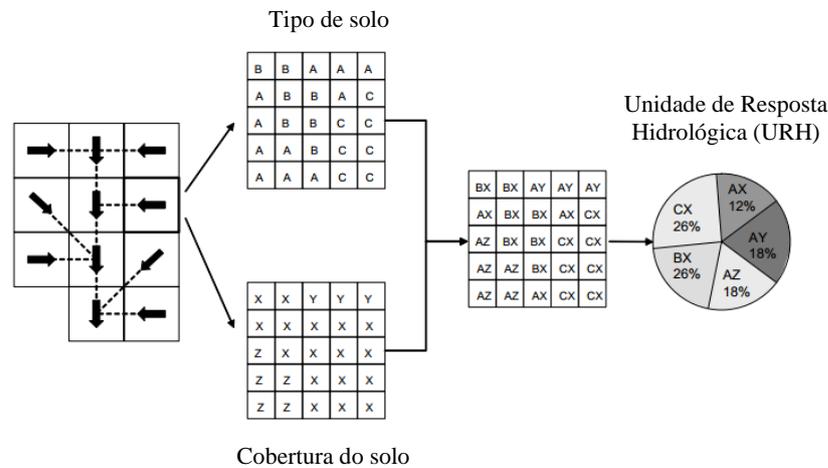


Figura 3.4 – Discretização da bacia em células quadradas e o conceito de URH.

Fonte: COLLISCHONN, 2007.

O balanço de água no solo é calculado em cada URH de cada célula, considerando variáveis como precipitação que atinge o solo, evapotranspiração; escoamento superficial, escoamento subsuperficial, entre outras. Contudo, aqui não se aprofundará nas formulações matemáticas devido ao fato de o modelo ter sido utilizado a nível de usuário.

Os parâmetros do MGB são divididos em parâmetros de vegetação, ditos fixos por não se alterarem durante a simulação, e parâmetros de solo (**Quadro 3.2**).

Quadro 3.2 – Parâmetros do modelo MGB-IPH.

Tipo	Parâmetro
Vegetação (Parâmetros fixos)	Albedo
	Altura da vegetação
	Índice de área foliar
	Resistência superficial em boas condições de umidade do solo
Solo	(Wm) Capacidade de armazenamento de água no solo
	(b) Relação entre armazenamento e saturação
	(CS) Drenagem Superficial (rápida)
	(Kbas) Controla escoamento subterrâneo
	(Kint) Controla escoamento sub-superficial
	Correção do tempo de concentração para drenagem superficial
	Correção do tempo de concentração para drenagem sub-superficial
	(CB) Tempo de residência – drenagem subterrânea
	(XL) Controla a curva de redução do reservatório subsuperficial
	(CAP) Água do reservatório subterrâneo que retorna ao solo (ascensão capilar)

Tipo	Parâmetro
	Fração da capacidade de armazenamento abaixo da qual não há geração de escoamento subterrâneo e sub-superficial

Fonte: JARDIM *et al.*, 2017.

3.4 Cenários de mudanças ambientais, econômicas e sociais

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) define cenários como “imagens do futuro que não são projeções nem previsões”. Eles têm se apresentado como ferramentas úteis para explorar futuros incertos em sistemas ecológicos e antropológicos, e diferem das projeções e previsões por descreverem alternativas futuras sob diferentes premissas de acordo com o entendimento atual sobre a maneira como os principais fatores determinantes interagem para afetar os ecossistemas. Um elemento importante dos cenários é a sua capacidade de capturar elementos qualitativos e quantitativos que definem condições futuras (SLEETER *et al.*, 2012).

Eles ajudam a entender consequências de longo prazo de decisões de curto prazo, assim como permitem que pesquisadores explorem possíveis futuros diferentes no contexto de incertezas futuras fundamentais. O aspecto mais importante do estabelecimento de cenários, talvez seja a integração entre diferentes comunidades de pesquisadores fornecendo uma base comum para avaliação de políticas mitigadoras, de impactos, opções de adaptação e mudanças nos sistemas físicos terrestres (RIAHI *et al.*, 2016).

Os planos de gerenciamento de recursos hídricos no Brasil têm adotado ideias diferentes para cenarização. O plano integrado de recursos hídricos (PIRH) da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul adotou os cenários Tendencial, Otimista e Pessimista. O plano da bacia hidrográfica do Recôncavo Sul, adotou os cenários Tendencial, CEN-01 (“Pagando pra ver”), CEN-02 (“No meio do caminho”) e CEN-03 (“Gestão à Vista”). Já o Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Camboriú e Bacias Contíguas adotou os cenários Tendencial, Urbanização, Esgotamento Adequado, Crescimento Moderado da Indústria e Implantação do “Parque inundável multiuso na Bacia do Rio Camboriú”. O plano da bacia hidrográfica do rio São Francisco adotou três cenários: A (menor desenvolvimento econômico e social), B (tendencial) e C (maior desenvolvimento e alta demanda). Há diversos outros exemplos, mas já é possível concluir que tendo por bases as ideias centrais de cenário tendencial, um cenário de maior disponibilidade e outro de menor disponibilidade, os consórcios responsáveis pela elaboração

dos planos não têm adotado uma padronização, mas seguindo apenas o contexto local da região contemplada pelo planejamento.

A falta de padrão citada, isto é, ausência de condições idênticas que permitam a conexão da comunidade científica, foi responsável pelo surgimento da necessidade de cenários que pudessem atender às demandas da comunidade que investiga os efeitos das mudanças climáticas. Foram criados então os cenários RCP e SSP.

Os SSPs (*Shared Socio-economic Pathways*) contêm cinco possíveis caminhos para o desenvolvimento socioeconômico futuro, descritas no **Quadro 3.3**, incluindo tendências para a agricultura e uso do solo (VAN VUUREN *et al.*, 2011). Eles são o primeiro esforço conjunto da comunidade científica no desenvolvimento de cenários de uso do solo baseados em narrativas comuns, assim como um conjunto harmonizado de fatores.

Estes cenários têm sido adotados pela comunidade científica em diferentes áreas, como por exemplo o trabalho de Wang & Sun (2022) que produziu projeções do PIB em escala global, de 2030 a 2100; o trabalho de Yao *et al.* (2022) que produziu projeções de condições hidrotérmicas para a Ásia Central, ou Jiang *et al.* (2022) que analisaram efeitos ecológicos das mudanças no uso do solo, entre outros.

Todos os cenários de SSP representam mudanças no uso da terra em resposta a demandas agrícolas e industriais, como alimentos, madeira, mas também bioenergia. A natureza e a direção dessas mudanças são, no entanto, fundamentalmente diferentes entre os SSPs. Os componentes de mudança no uso do solo nos cenários de base do SSP cobrem uma ampla gama de futuros possíveis. Por exemplo, os cenários mostram que, no futuro, a terra cultivada total poderá expandir ou contrair centenas de milhões de hectares ao longo deste século. Em comparação, o cenário SSP1 apresenta uma transformação sustentável do uso do solo com comparativamente pouca pressão sobre os recursos do solo devido às baixas projeções populacionais, dietas saudáveis com pouco desperdício de alimentos e alta produtividade agrícola. Esse cenário retrata uma reversão das tendências históricas, incluindo uma expansão gradual, em escala global e generalizada de florestas e outras terras naturais (POPP *et al.*, 2016).

Quadro 3.3 – Descrição dos cenários SSPs (*Shared Socio-economic Pathways*).

Cenário	Indicativo	Contexto	Descrição
SSP1	Sustentabilidade	Baixos desafios à mitigação e adaptação	O mundo muda gradualmente, mas de maneira generalizada, em direção a um caminho mais sustentável, enfatizando um desenvolvimento mais inclusivo que respeite as fronteiras ambientais percebidas. O gerenciamento dos bens comuns globais melhora lentamente, os investimentos em educação e saúde aceleram a transição demográfica e a ênfase no crescimento econômico muda para uma ênfase mais ampla no bem-estar humano. Impulsionada por um compromisso crescente de alcançar as metas de desenvolvimento, a desigualdade é reduzida entre países e dentro dos países. O consumo é orientado para baixo crescimento de material e menor intensidade de recursos e energia.
SSP2	Metade da estrada	Médios desafios para mitigação e adaptação	O mundo segue um caminho no qual as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam acentuadamente dos padrões históricos. O desenvolvimento e o crescimento da renda prosseguem de maneira desigual, com alguns países fazendo progressos relativamente bons, enquanto outros ficam aquém das expectativas. Instituições globais e nacionais trabalham para a consecução dos objetivos de desenvolvimento sustentável, mas progredem lentamente. Os sistemas ambientais sofrem degradação, embora haja algumas melhorias e, em geral, a intensidade do uso de recursos e energia diminui. O crescimento da população global é moderado e se estabiliza na segunda metade do século. A desigualdade de renda persiste ou melhora apenas lentamente e os desafios para reduzir a vulnerabilidade às mudanças sociais e ambientais permanecem.
SSP3	Rivalidade regional - uma estrada rochosa	Altos desafios à mitigação e adaptação	Um nacionalismo ressurgente, preocupações com competitividade e segurança e conflitos regionais levam os países a se concentrarem cada vez mais em questões domésticas ou, no máximo, regionais. As políticas mudam ao longo do tempo para se tornar cada vez mais orientadas para questões de segurança nacional e regional. Os países se concentram em alcançar as metas de segurança energética e alimentar em suas próprias regiões, à custa de um desenvolvimento mais amplo. Os investimentos em educação e desenvolvimento tecnológico declinam. O desenvolvimento econômico é lento, o consumo exige muito material e as desigualdades persistem ou pioram com o tempo. O crescimento da população é baixo nos países industrializados e alto nos países em desenvolvimento. Uma baixa prioridade internacional para lidar com as preocupações ambientais leva a uma forte degradação ambiental em algumas regiões.
SSP4	Desigualdade - uma estrada dividida	Baixos desafios à mitigação, altos desafios à adaptação	Investimentos altamente desiguais em capital humano, combinados com disparidades crescentes em oportunidades econômicas e poder político, levam a crescentes desigualdades e estratificação entre países e dentro dos países. Com o tempo, aumenta-se uma lacuna entre uma sociedade conectada internacionalmente que contribui para setores intensivos em conhecimento e capital da economia global e uma coleção fragmentada de sociedades de baixa renda e com

Cenário	Indicativo	Contexto	Descrição
			baixa escolaridade que trabalham em uma economia de baixa tecnologia e intensiva em mão-de-obra. A degradação da coesão social e os conflitos e agitações se tornam cada vez mais comuns. O desenvolvimento da tecnologia é alto na economia e nos setores de alta tecnologia. O setor de energia conectado globalmente diversifica, com investimentos em combustíveis intensivos em carbono, como carvão e óleo não convencional, mas também em fontes de energia de baixo carbono. As políticas ambientais se concentram em questões locais nas áreas de média e alta renda.
SSP5	Desenvolvimento de combustíveis fósseis - Tomando a estrada	Altos desafios à mitigação, baixos desafios à adaptação	Este mundo coloca uma fé crescente em mercados competitivos, inovação e sociedades participativas para produzir rápido progresso tecnológico e desenvolvimento de capital humano como caminho para o desenvolvimento sustentável. Os mercados globais estão cada vez mais integrados. Também existem fortes investimentos em saúde, educação e instituições para aumentar o capital humano e social. Ao mesmo tempo, o impulso para o desenvolvimento econômico e social é associado à exploração de recursos abundantes de combustíveis fósseis e à adoção de estilos de vida intensivos em recursos e energia em todo o mundo. Todos esses fatores levam ao rápido crescimento da economia global, enquanto a população global atinge o pico e diminui no século XXI. Problemas ambientais locais, como poluição do ar, são gerenciados com sucesso. Existe fé na capacidade de gerenciar efetivamente sistemas sociais e ecológicos, inclusive por geo-engenharia, se necessário.

Fonte: RIAHI *et al.*, 2016.

O montante de mudanças climáticas futuras é explorado através dos RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que são cenários contendo emissões, concentração e trajetória de uso do solo desenvolvidos com o objetivo de fornecer informações sobre possíveis trajetórias de desenvolvimento para os principais agentes forçantes de mudanças climáticas, permitindo análises subsequentes por modelos climáticos e pelos modelos integrados de avaliação (IAM) (VAN VUUREN, 2011).

Estes cenários levam em conta os impactos das emissões, ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no sistema terrestre. Os RCPs são identificados por sua forçante radiativa total, expressa em W/m^2 , a ser atingida durante ou próximo ao final do século XXI (IPCC, 2014):

- RCP 2.6 W/m^2 (cenário de mitigação, leva a um nível muito baixo da forçante);
- RCP 4.5 W/m^2 e RCP 6.0 W/m^2 (dois cenários de estabilização); e
- RCP 8.5 W/m^2 (cenário com emissões muito altas de gases de efeito estufa).

3.5 Banco de Dados de Uso e Cobertura do Solo dos cenários SSP-RCP

O modelo de desagregação espacial (Demeter) foi utilizado por Chen *et al.* (2020) para produzir um banco de dados que contém uma projeção global de uso do solo com resolução espacial de 0,05° para os anos de 2015 a 2100, intervalados de 5 anos. Os dados são disponibilizados no formato NetCDF, de modo que seu processamento foi realizado através da linguagem de programação python, o que envolveu a conversão para formatos usuais de arquivos georreferenciados.

Cada uso do solo corresponde a uma relação entre os cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) e *Representative Concentration Pathways* (RCP), totalizando 9 cenários. Considerando os 3 pontos de controle utilizados (Retiro Baixo, Sobradinho e Itaparica), foram realizadas 27 simulações. Cada projeção contém 32 categorias de uso do solo que são usualmente utilizadas em Modelos de Sistema Terrestre (ESMs). Para a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, foram identificados 26 usos, descritos no **Quadro 3.4** e **Figura 3.5**.

Quadro 3.4 – Usos do solo representativos dos cenários SSP-RCP identificados na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Usos do solo representativos dos cenários SSP-RCP identificados na BHRSF	
Água	Soja - irrigado
Árvore perene de folha larga – Tropical	Algodão - sequeiro
Árvore perene de folha larga – Temperado	Algodão - irrigado
Árvore decídua de folha larga – Tropical	Arroz - sequeiro
Árvore decídua de folha larga - Temperado	Arroz irrigado
Arbusto decídua de folha larga - Temperado	Cana de açúcar - sequeiro
Gramma - Estações Frias	Cana de açúcar - irrigado
Gramma - Estações quentes	Outras culturas de sequeiro
Milho – sequeiro	Outras culturas irrigadas
Milho – irrigado	Culturas de bioenergia - sequeiro
Trigo – sequeiro	Culturas de bioenergia - irrigado
Trigo – irrigado	Área Urbana
Soja – sequeiro	Solo árido, improdutivo ou estéril

Fonte: Autor.

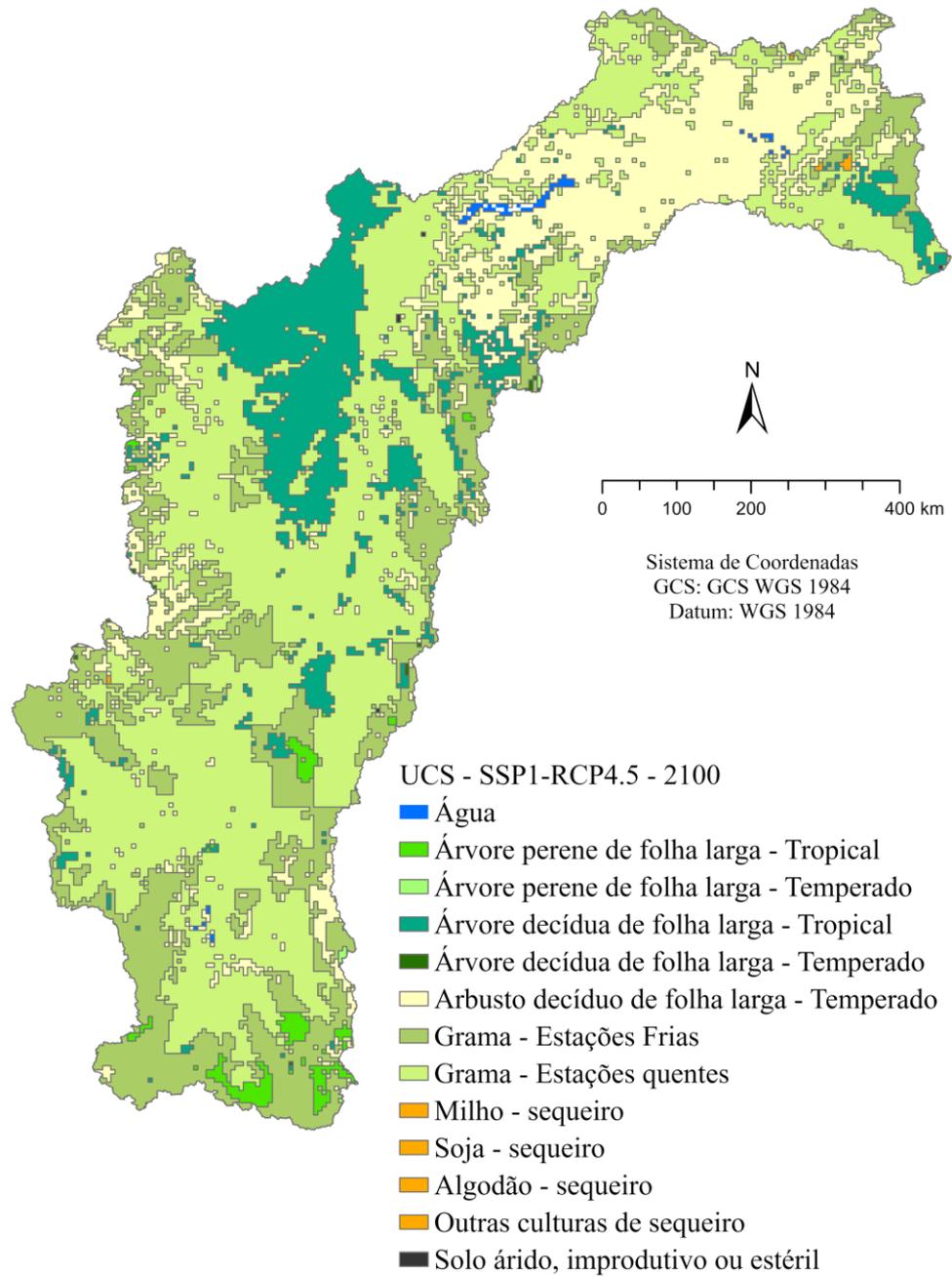


Figura 3.5 – Mapa com os usos do solo representativos do cenário SSP1-RCP2.6 para o ano 2100.

Fonte: Banco de dados de Chen *et al.* (2020).

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização deste trabalho, descrita na **Figura 4.1**, pode ser amplamente dividida em processamento de dados e simulação. No primeiro momento, foi realizada a obtenção dos dados referentes às condições meteorológicas, hidrológicas e físicas da bacia, sendo manipulados de modo a serem inseridos no modelo para calibração e validação.

Em seguida, os dados de uso e cobertura do solo representativos dos cenários abordados foram convertidos em formatos usuais de geoprocessamento através da linguagem de programação python. Para analisar a influência do uso destes dados na simulação, as mesmas condições da validação foram mantidas, modificando apenas com a inserção dos dados do uso e cobertura do solo dos cenários. Como o resultado da simulação foi satisfatório, dentro do critério de eficiência adotado nesta metodologia, eles foram utilizados juntamente com projeções de precipitação para cada um dos 9 cenários relacionados SSP-RCP para simular a vazão em 2050 e 2100. Este capítulo abordará em detalhes cada uma das etapas descritas acima.

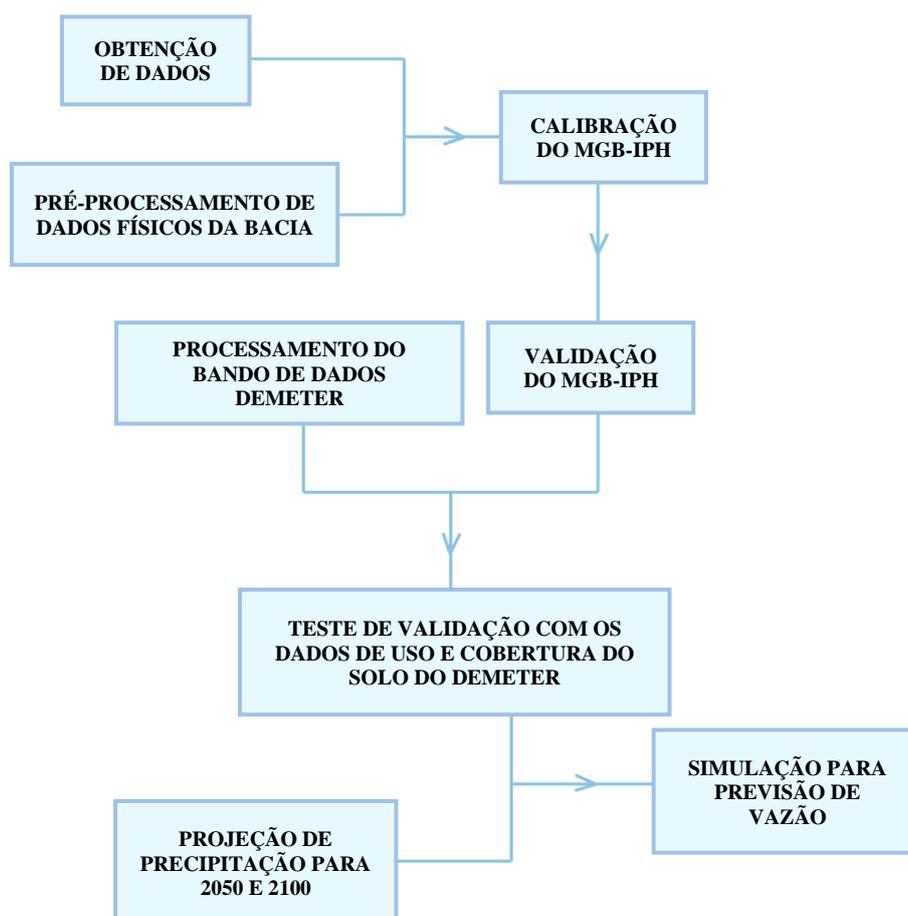


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de trabalho adotada

Fonte: Autor.

Este trabalho foi realizado na bacia hidrográfica do rio São Francisco, sendo discretizada em três sub-bacias que representassem aproximadamente os limites das regiões de planejamento. Embora haja um grande aproveitamento hidroelétrico na região, foi desconsiderada, artificialmente, a existência das hidrelétricas. Para tal, foram utilizadas vazões naturalizadas obtidas pelo ONS. Três hidrelétricas foram selecionadas ao longo da bacia, cada uma próxima do exutório das sub-bacias adotadas, para serem utilizadas como pontos de controle devido à disponibilidade de dados de vazão naturalizada, sendo elas as hidrelétricas de Retiro Baixo, Sobradinho e Itaparica, demonstradas na **Figura 4.2**.

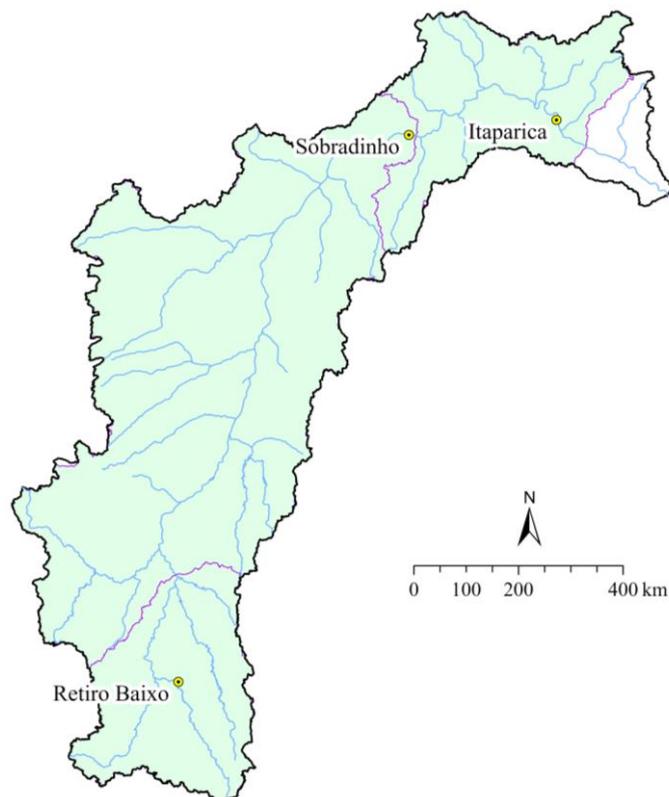


Figura 4.2 – Sub-bacias utilizadas para a calibração do modelo e hidrelétricas adotadas como pontos de controle

Fonte: Autor.

4.1 Dados de entrada do MGB

As etapas para aplicação do MGB são esquematizadas no fluxograma da **Figura 4.3**, de acordo com o manual de aplicação da versão MGB-IPH 2017 (JARDIM *et al*, 2017).

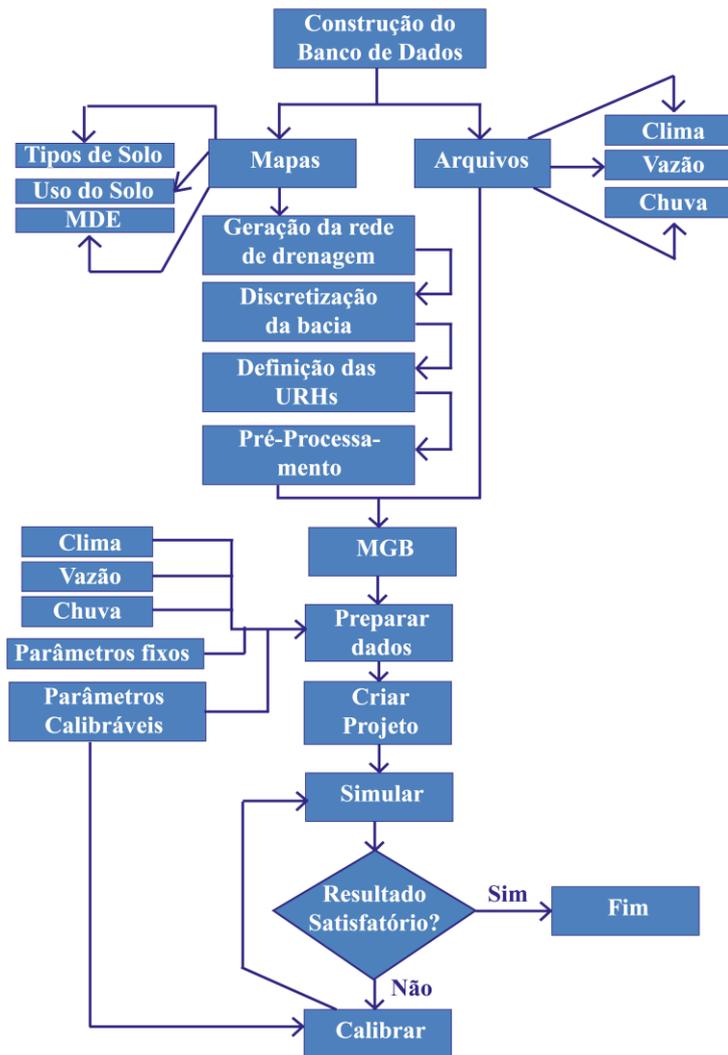


Figura 4.3 – Etapas para o uso do modelo MGB-IPH.

Fonte: JARDIM *et al.*, 2017.

Os dados de entrada do MGB, de acordo com a **Figura 4.3**, podem ser caracterizados como físicos e climatológicos. Os dados hidrológicos e meteorológicos incluem dados de vazão, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar. Os dados de vazão incluem vazão observada em postos fluviométricos e dados de vazões naturalizadas.

As séries de vazões naturais correspondem a dados que não são medidos diretamente, mas calculados a partir dos dados observados, das informações sobre a operação de reservatórios e sobre as retiradas de água para usos consuntivos. Em outras palavras, correspondem aos dados de vazão que seriam observados nos locais das barragens, se não

existissem os aproveitamentos hidrelétricos e os usos consultivos. Estas vazões são muito importantes, pois já que o modelo não considera os aproveitamentos hidrelétricos, a saída do MGB foi comparada com as vazões naturalizadas. Os dados físicos foram obtidos pelas fontes:

- Tipo do Solo: INPE;
- Uso e cobertura do solo (Utilizados no teste de validação e nas projeções): Banco de dados representativos dos cenários (CHEN *et al.*, 2020);
- Unidades de Resposta Hidrológica (Utilizadas na calibração e validação do MGB-IPH): Produto obtido do IPH (FAN *et al.*, 2015);
- Relevo: Modelo Numérico do Terreno (MNT) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), sendo reespecializados para resolução de célula de 200 m;

Os dados hidrológicos e meteorológicos foram obtidos através da linguagem de programação python, fazendo uso do módulo Hydrobr (Carvalho, 2020) para os dados de precipitação e vazão naturalizada do ONS, como segue.

- Chuva observada: Agência Nacional de Águas (ANA), com até 20% de falhas durante todo o período disponível (457 Estações);
- Dados Meteorológicos: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Vazão naturalizada: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

4.2 Calibração e Validação

A calibração do modelo foi realizada de forma manual. Esta escolha se deu devido ao tempo consideravelmente longo para realizar uma simulação, de modo que a calibração automática, que realiza dezenas de simulações, se tornou inviável.

Foram realizadas 10 simulações, utilizando os valores dos parâmetros obtidos em Silva (2005) como ponto de partida, alterando-os a cada simulação de maneira que o hidrograma simulado se aproximasse do hidrograma observado de vazões naturalizadas. Os parâmetros alterados foram:

- Capacidade de armazenamento de água no solo (W_m),

- Relação entre armazenamento e saturação (b),
- Escoamento subterrâneo (Kbas),
- Escoamento sub-superficial (Kint),
- Drenagem superficial (CS), e
- Tempo de residência – drenagem subterrânea (CB).

O período escolhido para calibração foi selecionado a partir do gráfico de Gantt da **Figura 4.4**, de 01/10/1964 a 01/12/1991, onde pareceu haver, visualmente, uma maior densidade de estações. Contudo, observou-se que a vazão naturalizada de Retiro Baixo só continha dados a partir de 01/01/1987. Devido a este fator, mesmo com a simulação tendo iniciado em 1964, os gráficos e cálculos apresentados neste trabalho foram realizados de 1987 a 1991. Vale ressaltar que como o ponto de partida da simulação foi em um período bem anterior à 1987, o período de aquecimento do modelo já foi excluído juntamente com os dados anteriores a 1987.

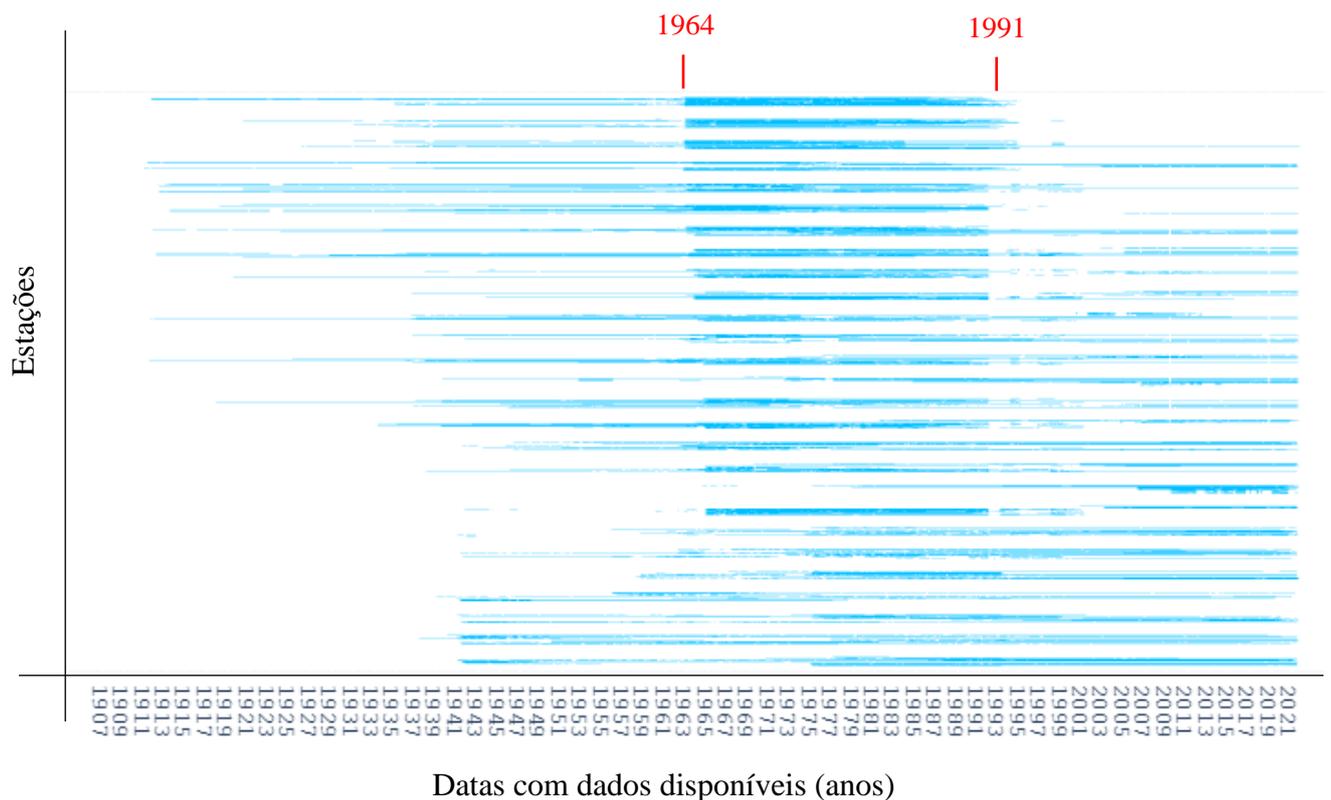


Figura 4.4 – Gráfico de Gantt

Fonte: Dados obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA).

A Validação foi realizada de modo a englobar o primeiro ano da análise central, isto é, 2015. Desta forma, o período de 2010 a 2017 foi escolhido, considerando alguns anos iniciais de segurança para o período de aquecimento do modelo hidrológico. Através de análise visual, foi considerado 2 anos como período de aquecimento, sendo excluídos da análise e resultando no período apresentado neste trabalho, de 2012 a 2017.

Para análise da eficiência da simulação hidrológica foi realizada através de duas funções objetivo: o coeficiente de Nash e Sutcliffe e o RMSE.

O coeficiente de eficiência, ou coeficiente de Nash e Sutcliffe, é uma medida da qualidade do ajuste entre duas séries de dados e foi proposto como uma alternativa ao coeficiente de determinação, devido ao fato de este ser aplicável, teoricamente, apenas a modelos lineares e assumir que o modelo testado não é enviesado – a soma dos erros é igual a zero (McCUE *et al.*, 2006). É possível citar como diferença ainda o fato de que o coeficiente de eficiência pode assumir valores negativos, diferentemente do coeficiente de determinação. Nash e Sutcliffe (1970) afirmam que este coeficiente pode ser chamado de R^2 por contabilizar a variância mútua, e é definido pela expressão:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum^N (q' - q)^2}{\sum^N (q - \bar{q})^2}$$

onde q' representa os níveis d'água simulados; q , os observados, \bar{q} a média dos níveis observados, e N é o tamanho da amostra. Se os dados simulados não são enviesados, o R^2 está entre 0 e +1. Para a maioria dos modelos hidrológicos – não lineares – é possível obter coeficientes de eficiência negativos até quando o modelo não é enviesado (McCUE, 2006). Valores menores que zero indicam que a média dos dados observados é melhor que o valor simulado. Portanto, eficiência inaceitável (GOLMOHAMMADI *et al.*, 2014). Para escala diária, mensal ou anual, é recomendado que seja maior que 0,50 (MORIASI *et al.*, 2015).

De todas as possíveis curvas de regressão, a curva dos mínimos quadrados é a que apresenta menor erro padrão da estimativa, sendo este uma medida de dispersão dos dados em torno da reta ou curva de regressão gerada pelos valores observados e simulados (SPIEGEL, 1978). Desta forma, o erro padrão, ou raiz quadrada do erro médio quadrático, no inglês RMSE (Root Mean Square Error), é calculado de acordo com a equação abaixo. Os valores menores indicam variância residual menor, sendo os valores próximos de zero os ideais.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (q - q')^2}$$

Onde, q representa os níveis d'água observados; q' , os valores simulados; e N , o número de dados.

4.3 Criação e Simplificação das URHs e dos Tipo do Solo

As URHs foram criadas a partir da composição dos dados de uso do solo e dos tipos de solo, o que ao ser realizado sem simplificação, resultou em mais de 300 URHs. Algumas das combinações geradas não são diferenciáveis (ex: classe "água" em solo profundo ou raso, ou "água" com qualquer tipo de classe de cobertura vegetal, deve compor uma única classe "água", pois não há importância hidrológica na distinção entre os solos, nem entre os tipos de cobertura vegetal, das regiões cobertas por água), ou não ocorrem, seja por acaso ou porque certos tipos de vegetação ou uso da terra são incompatíveis com certos tipos de solos.

Desta forma, a metodologia utilizada por FAN *et al.* (2015) foi adotada neste trabalho para simplificar os usos e tipos do solo, isto é, agrupando-os em novas classes de acordo com o **Quadro 4.1**, e os usos descritos em Silva (2005) foram adaptados para simplificar os usos do solo representativos dos cenários SSP-RCP (**Quadro 4.2**).

Quadro 4.1 – Simplificação dos dados de Tipo do Solo

Tipo de Solo adotado para Simplificação	Tipo de Solo (INPE)
Profundo Baixo potencial de escoamento, ou solos profundos;	Latosolos
	Nitossolos
	Areias Quartzarenicas
	Chernossolos
	Plintossolos
	Vertissolos
	Organossolos
Raso Alto potencial de escoamento, ou solos rasos;	Argissolos
	Neossolos
	Litossolos
	Luvissolos
Saturados Solos saturados e de várzea	Cambissolos
	Gleissolo
	Fluvissolo
	Planossolo
	Espodossolos

Tipo de Solo adotado para Simplificação	Tipo de Solo (INPE)
ASI Áreas semi-impermeáveis	Afloramentos Rochosos
Água	Água

Fonte: Autor.

Quadro 4.2 – Simplificação dos dados de Uso do Solo de Chen *et al.* (2020).

Tradução	Uso do Solo Simplificado Adotado
Água	Água
Árvore perene de folha larga - Tropical	Floresta
Árvore perene de folha larga - Temperado	Floresta
Árvore decídua de folha larga - Tropical	Caatinga
Árvore decídua de folha larga - Temperado	Caatinga
Arbusto decíduo de folha larga - Temperado	Caatinga
Grama - Estações Frias	Cerrado
Grama - Estações quentes	Cerrado
Milho - sequeiro	Agricultura
Milho - irrigado	Agricultura
Trigo - sequeiro	Agricultura
Trigo - irrigado	Agricultura
Soja - sequeiro	Agricultura
Soja - irrigado	Agricultura
Algodão - sequeiro	Agricultura
Algodão - irrigado	Agricultura
Arroz - sequeiro	Agricultura
Arroz irrigado	Agricultura
Cana de açúcar - sequeiro	Agricultura
Cana de açúcar - irrigado	Agricultura
Outras culturas de sequeiro	Agricultura
Outras culturas irrigadas	Agricultura
Culturas de bioenergia - sequeiro	Agricultura
Culturas de bioenergia - irrigado	Agricultura
Área Urbana	ASI
Solo árido, improdutivo ou estéril	ASI

Fonte: Autor.

A combinação entre os dados de uso e cobertura do solo e dos tipos de solo proveniente do INPE, resultou em 11 Unidades de Resposta Hidrológica (URH), de acordo com a **Tabela 4.1**, exemplificadas na **Figura 4.5**.

Tabela 4.1 – Unidades de Resposta Hidrológica (URH).

Unidades de Resposta Hidrológica	Abreviação
Floresta em Solo Profundo	FlorPro
Floresta em Solo Raso	FlorRas
Saturado	Saturado
ASI	ASI
Caatinga em Solo Profundo	CaatPro
Caatinga em Solo Raso	CaatRas
Cerrado em Solo Profundo	CerrPro
Cerrado em Solo Raso	CerrRas
Agricultura em Solo Profundo	AgriPro
Agricultura em Solo Raso	AgriRas
Água	Água

Fonte: Autor.

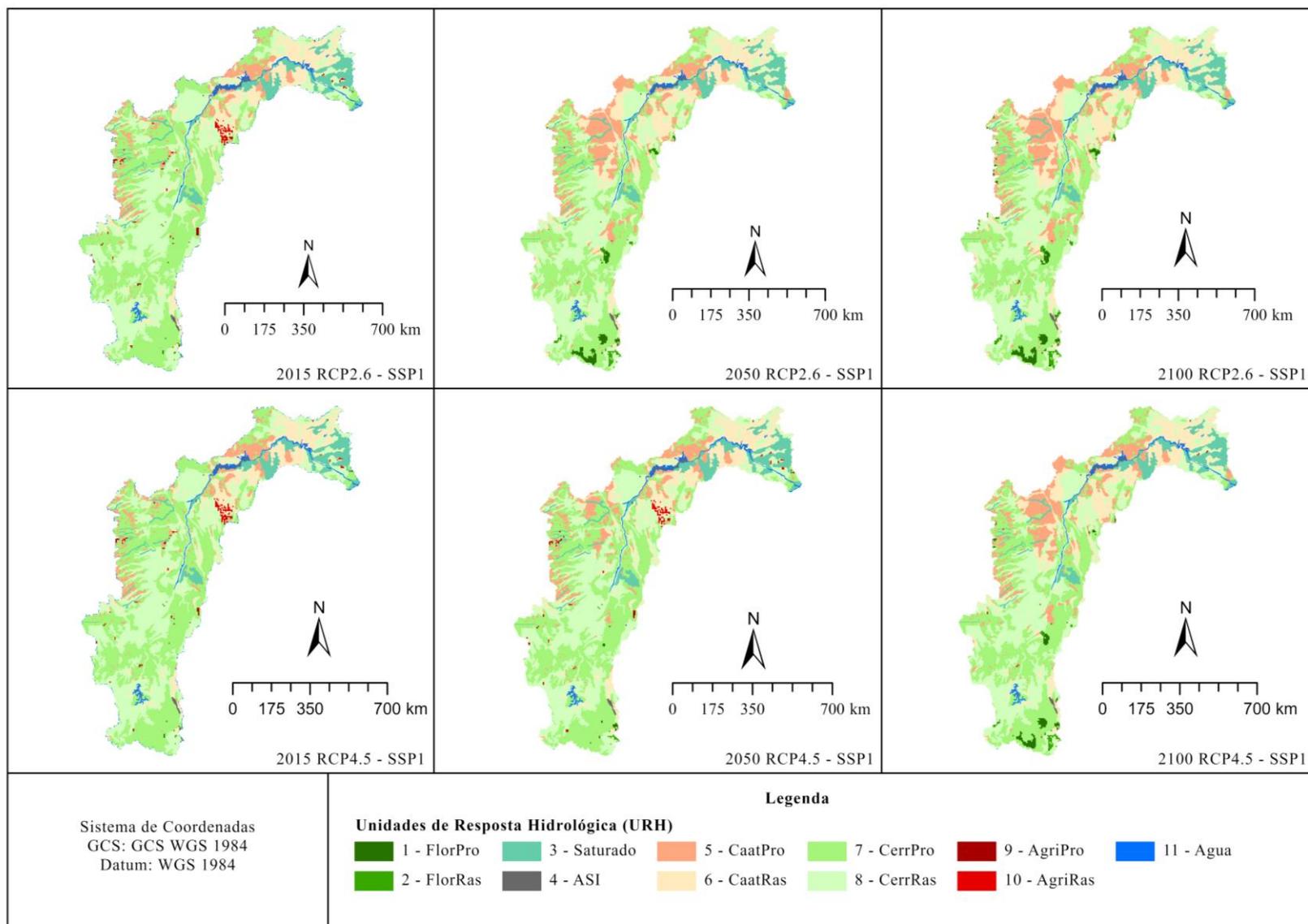


Figura 4.5 – Unidades de Resposta Hidrológica (URH) para os cenários SSP1 RCP 2.6 e 4.5.

Fonte: Autor.

4.4 Projeção de vazão para 2050 e 2100

Como uma tentativa de testar a viabilidade da utilização dos dados de uso e cobertura do solo representativos dos cenários, foi realizada uma simulação com exatamente as mesmas condições da Validação descritas no item 4.3, substituindo apenas as URHs obtidas pelo IPH pelas URHs criadas com os dados provenientes do Demeter. O objetivo foi comparar a eficiência em ambos os casos para analisar o quão próximo da realidade a simulação consegue chegar com os dados representativos dos cenários.

O ano de 2015 foi escolhido para este teste devido à disponibilidade de dados de precipitação e vazão na região que coincide com a disponibilidade de dados de uso e cobertura do solo dos cenários.

As projeções de vazão foram realizadas para os anos 2050 e 2100. Para simular as condições dos cenários SSP-RCP nestas datas, foram utilizadas URHs criadas com dados de uso e cobertura do solo provenientes do Demeter e uma projeção da precipitação, isto é, para cada simulação, foi inserido um conjunto de dados. Por exemplo, para iniciar a simulação do ano de 2050 foram inseridas as projeções de precipitação para o ano de 2050 e as URHs para o ano de 2050, de cada cenário SSP-RCP. Estas condições iniciais não foram alteradas ao longo da simulação. A vazão na bacia foi analisada, sob a ótica da estatística descritiva, de acordo com os valores de mínimo, máximo, média, mediana e a vazão de interesse Q_{90} .

As taxas aplicadas nos dados de precipitação de 2015 para ter a projeção de chuva em 2050 e 2100 foram escolhidas de acordo com as mudanças no ciclo da água descritas em relatório do IPCC sobre mudanças climáticas (IPCC, 2013). Segundo o relatório, a precipitação média global irá crescer até o final do século XXI de acordo com a variação da temperatura:

- 0,5 a 4% $^{\circ}\text{C}^{-1}$ para o cenário RCP 2.6, sendo adotado o valor de 1%;
- 1 a 3% $^{\circ}\text{C}^{-1}$ para os demais cenários RCP, sendo adotado o valor de 3%.

Por sua vez, estima-se que para o cenário RCP 2.6, a temperatura irá aumentar aproximadamente 1°C até 2065 e 1°C entre 2065 e 2100. No cenário RCP 4.5 estima-se que a temperatura irá aumentar aproximadamente $1,4^{\circ}\text{C}$ até 2065 e $1,8^{\circ}\text{C}$ entre 2065 e 2100 (IPCC, 2013).

A **Equação 4.1** descreve o cálculo realizado para a precipitação no ano de 2050 no cenário RCP 2.6. A **Equação 4.2** descreve o cálculo realizado para a precipitação no ano de 2100 no mesmo cenário.

$$P(RCP2.6)_{2050} = P_{2015} \times 1^{\circ}C \times (1 + 1\%) \quad \text{Equação 4.1}$$

$$P(RCP2.6)_{2100} = P_{2050} \times 1^{\circ}C \times (1 + 1\%) \quad \text{Equação 4.2}$$

A **Equação 4.3** descreve o cálculo realizado para a precipitação no ano de 2050 no cenário RCP 4.5. A **Equação 4.4** descreve o cálculo realizado para a precipitação no ano de 2100 no cenário RCP 4.5.

$$P(RCP4.5)_{2050} = P_{2015} \times 1,4^{\circ}C \times (1 + 3\%) \quad \text{Equação 4.3}$$

$$P(RCP4.5)_{2100} = P_{2050} \times 1,8^{\circ}C \times (1 + 3\%) \quad \text{Equação 4.4}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um cenário pode ser aplicado independente da metodologia que seja utilizada. Pela definição, eles são é uma imagem do futuro que não precisa ser considerada uma previsão. Desta forma, tanto pode estar mais próximo possível, do real, quanto mais próximo do abstrato.

Um modelo hidrológico, contudo, para ser considerado aplicável a uma região, precisa atender a um patamar mínimo de eficiência, sendo as medidas escolhidas para este trabalho o coeficiente de Nash-Sutcliff (R^2) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE). Ainda assim, existe a possibilidade de eficiência abaixo do adequado devido à má qualidade dos dados inseridos, de forma que este modelo pode ser considerado aplicável através da análise de várias aplicações anteriores presentes na literatura.

Se o modelo é validado na literatura e a eficiência da simulação não foi boa, os dados devem ser analisados. No caso do presente trabalho, o modelo MGB-IPH já foi amplamente utilizado e, portanto, validado, na bacia hidrográfica do rio São Francisco, de modo que os fatores que podem ser determinantes para a qualidade dos resultados são os dados de projeção da precipitação e os dados de uso e cobertura do solo representativos dos cenários SSP-RCP.

5.1 Calibração e Validação

A calibração do MGB-IPH para o ponto de controle na hidrelétrica Retiro Baixo resultou em um coeficiente de eficiência (R^2) de 0,86 e RMSE de 40,73, sendo este o resultado mais eficiente encontrado, em relação aos três pontos de controle, descrito na **Figura 5.1**.

A validação, como mencionado anteriormente, foi realizada para o período de 01/01/2012 a 01/01/2017, resultando para o ponto de controle em retiro baixo (**Figura 5.2**) um R^2 de 0,74 e RMSE de 58,15.

O ponto de controle localizado na hidrelétrica de Sobradinho (**Figura 5.3**) resultou em um coeficiente de eficiência (R^2) de 0.73 e RMSE de 899,28. O alto valor do RMSE pode ser explicado pela ordem de grandeza dos valores das vazões.

A validação para este ponto de controle (**Figura 5.4**) resultou em um R^2 de 0,74, praticamente igual ao da calibração. Contudo, o menor valor do RMSE, 634,64, indica que a

validação foi mais eficiente até que a calibração, isto é, houve uma menor dispersão dos dados em torno da reta ou curva de regressão gerada pelos valores observados e simulados.

A calibração realizada no ponto de controle em Itaparica (**Figura 5.5**) resultou em um R^2 de 0,71 e RMSE igual a 963,84. A Validação para este ponto de controle (**Figura 5.6**) resultou em um R^2 de 0,75 e RMSE igual a 626,66. O resultados para a simulação da validação, portanto, foram mais eficientes que os da calibração nas duas funções objetivo. Desta forma, os parâmetros (**Quadro 5.1 a Quadro 5.4**) utilizados foram considerados satisfatórios.

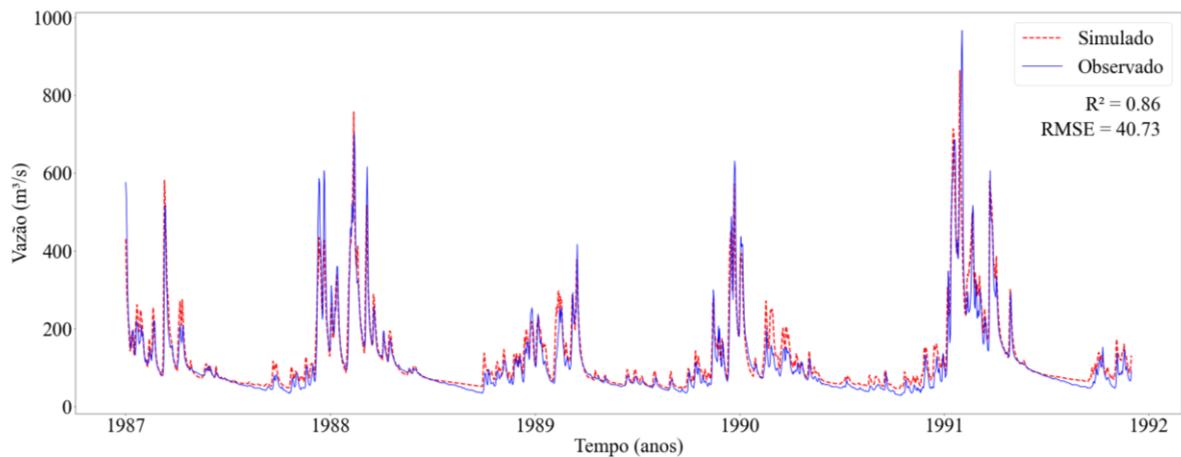


Figura 5.1 – Calibração do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Retiro Baixo.
Fonte: Autor.

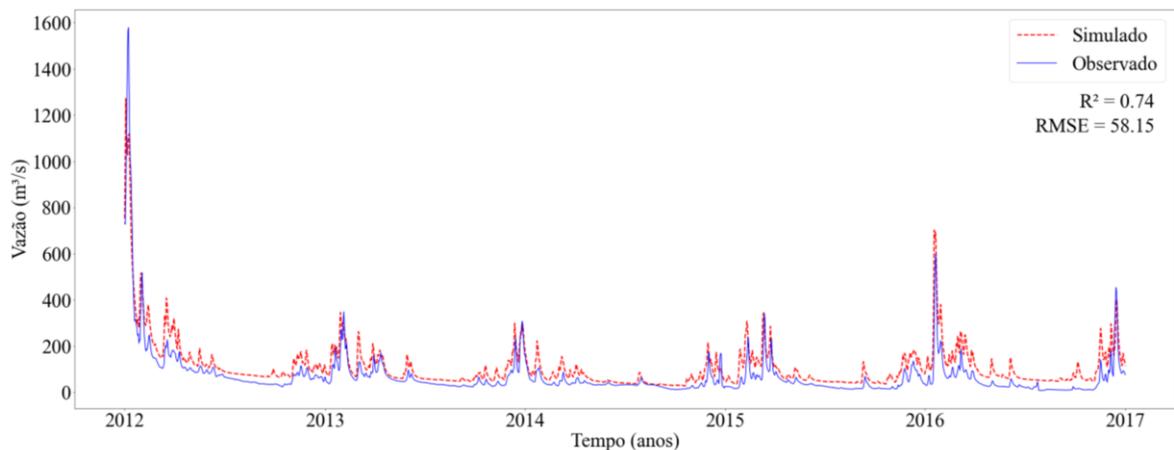


Figura 5.2 – Validação do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Retiro Baixo
Fonte: Autor.

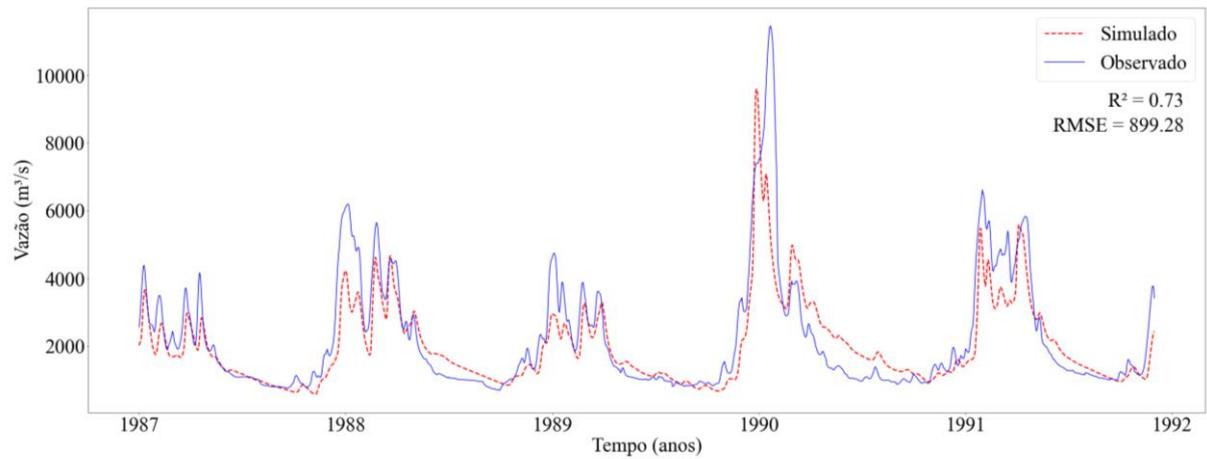


Figura 5.3 – Calibração do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Sobradinho.
Fonte: Autor.

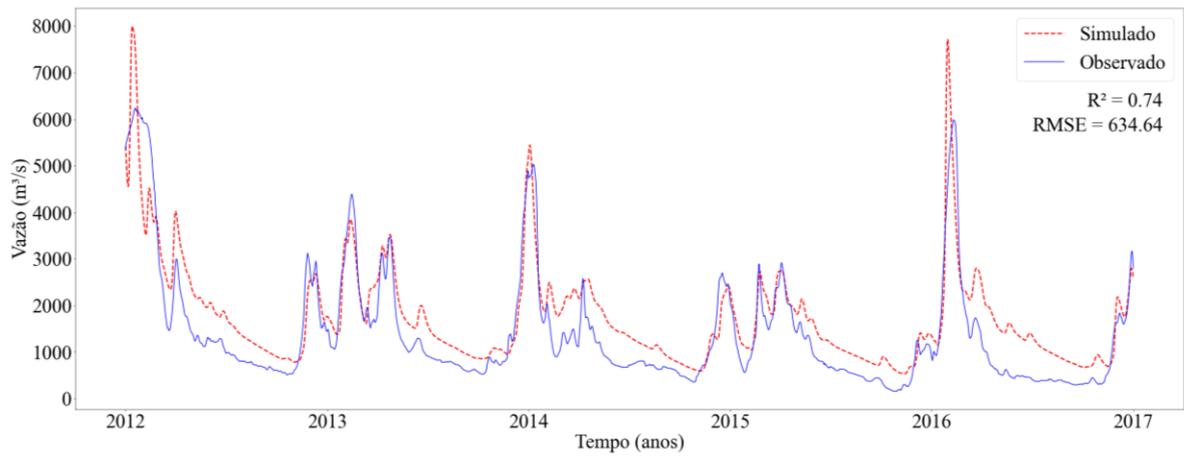


Figura 5.4 – Validação do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Sobradinho.
Fonte: Autor.

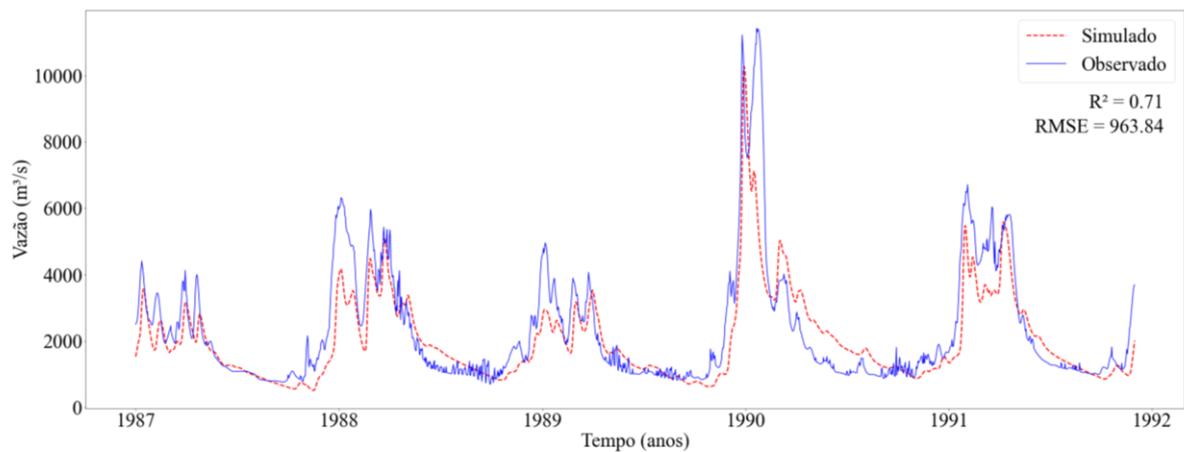


Figura 5.5 – Calibração do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Itaparica.
Fonte: Autor.

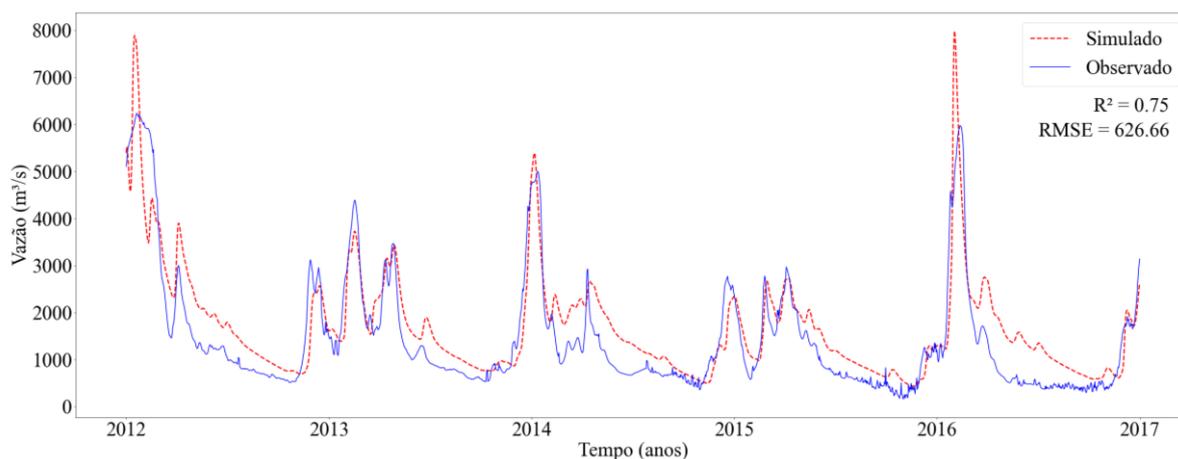


Figura 5.6 – Validação do MGB para o ponto de controle na hidrelétrica Itaparica.

Fonte: Autor.

Quadro 5.1 – Parâmetros de Solo adotados para as URH da sub-bacia localizada no submédio São Francisco.

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorPro	2400	0.2	1.7	50	0.7	0	0.5
FlorRas	2400	0.2	1.7	50	0.7	0	0.5
Saturado	2300	0.2	1.7	50	0.7	0	0.5
ASI	200	0.2	0.04	20	0.7	0	0.5
CaatPro	500	0.2	1.7	20	0.7	0	0.5
CaatRas	500	0.2	1.7	20	0.7	0	0.5
CerrPro	2100	0.2	1.7	50	0.7	0	0.5
CerrRas	2100	0.2	1.7	50	0.7	0	0.5
AgriPro	900	0.2	1.7	30	0.7	0	0.5
AgriRas	800	0.2	1.7	50	0.7	0	0.5
Água	0	0.1	0.8	30	0.7	0.5	0.5

CS	30
CI	100
CB	4000
QB_ m ³ /(s . km ²)	0.01

Quadro 5.2 – Parâmetros de Solo adotados para as URH da sub-bacia localizada no médio São Francisco.

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorPro	2300	0.1	2	50	0.7	0	0.5
FlorRas	2300	0.1	2	50	0.7	0	0.5
Saturado	1600	0.1	2	0	0	0	0
ASI	200	0.1	2	20	0.7	0	0.5
CaatPro	1200	0.1	2	20	0.7	0	0.5

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
CaatRas	1200	0.1	2	20	0.7	0	0.5
CerrPro	1400	0.1	2	50	0.7	0	0.5
CerrRas	1400	0.1	2	50	0.7	0	0.5
AgriPro	1400	0.1	2	30	0.7	0	0.5
AgriRas	1200	0.1	2	50	0.7	0	0.5
Agua	0	0.1	0.04	30	0.7	0.5	0.5

CS	30
CI	100
CB	4000
QB_m ³ /(s . km ²)	0.01

Quadro 5.3 – Parâmetros de Solo adotados para as URH da sub-bacia localizada no alto São Francisco.

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorPro	2600	0.5	1.9	40	0.7	0	0.5
FlorRas	250	0.5	1.9	40	0.7	0	0.5
Saturado	1100	0.5	1.9	40	0.7	0	0.5
ASI	200	0.5	1	10	0.7	0	0.5
CaatPro	1200	0.5	1.9	10	0.7	0	0.5
CaatRas	1200	0.5	1.9	10	0.7	0	0.5
CerrPro	1200	0.5	1.9	40	0.7	0	0.5
CerrRas	1200	0.5	1.9	40	0.7	0	0.5
AgriPro	1400	0.5	1.9	20	0.7	0	0.5
AgriRas	1400	0.5	1.9	40	0.7	0	0.5
Agua	200	0.5	1	10	0.7	0	0.5

CS	30
CI	100
CB	5000
QB_m ³ /(s . km ²)	0.01

Quadro 5.4 – Parâmetros de Vegetação

URH	Albedo	Índice de Área Foliar	Altura Média da Vegetação	Resistência Da Superfície
FlorPro	0.16	8.0	30.0	150
FlorRas	0.11	6.0	10.0	100
Saturado	0.1	0.0	0.5	100
ASI	0.15	0.1	0.5	10
CaatPro	0.13	0.4	1.0	80
CaatRas	0.13	0.4	1.0	80
CerrPro	0.18	1.0	7.0	100
CerrRas	0.18	1.0	7.0	100
AgriPro	0.26	6.0	2.0	100
AgriRas	0.15	0.5	0.5	70
Agua	0.08	1.0	0.1	0

Fonte: adaptados de Silva (2005).

5.2 Teste de aplicabilidade dos dados de uso e ocupação do solo provenientes do modelo Demeter

A aplicabilidade dos dados foi analisada de acordo com o período de 2012 a 2017. Tendo em vista que os cenários representam narrativas de trajetória futura da humanidade, o ano de 2015 apresentou área idêntica para todos os 27 pontos de controle, como esperado para o presente. A simulação resultou em séries de vazão iguais, que quando comparadas com a vazões naturalizadas, resultaram nas seguintes funções objetivo:

- Retiro Baixo: $R^2 = 0.53$, RMSE = 78.18;
- Sobradinho: $R^2 = 0.49$, RMSE = 889.89; e
- Itaparica: $R^2 = 0.54$, RMSE = 854.03.

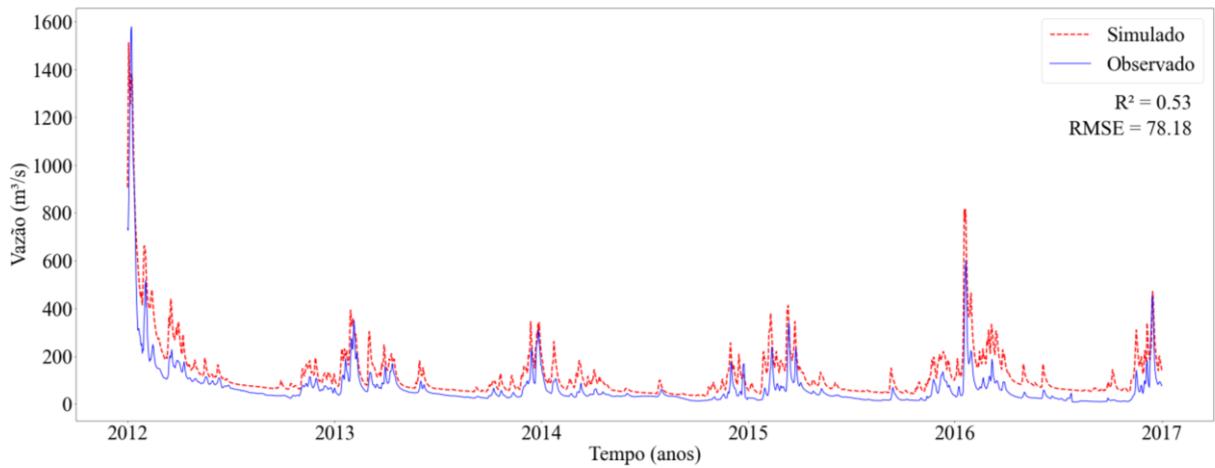


Figura 5.7 – Hidrograma da simulação do cenário RCP2.6-SSP1 para o ponto de controle em Retiro Baixo.

Fonte: Autor.

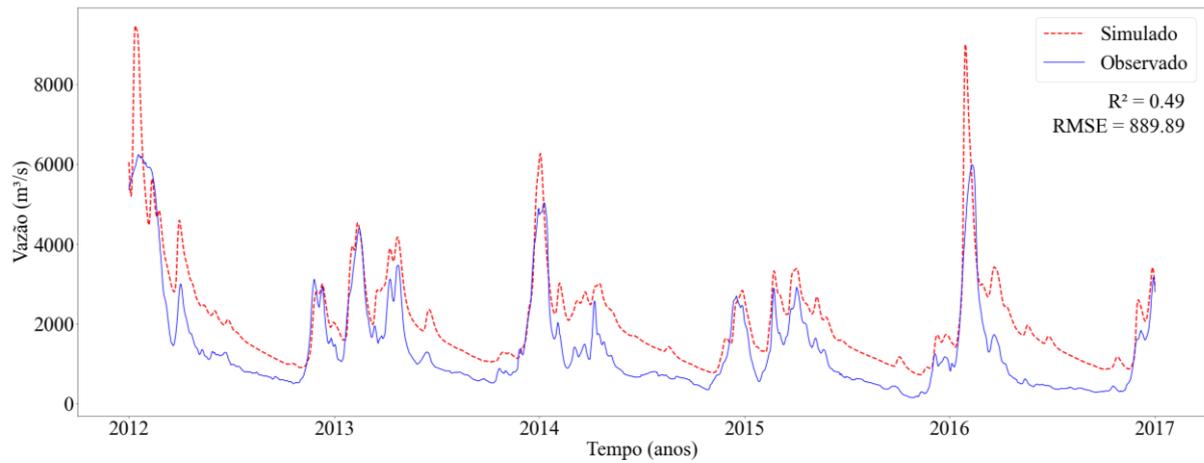


Figura 5.8 – Hidrograma da simulação do cenário RCP2.6-SSP1 para o ponto de controle em Sobradinho.

Fonte: Autor.

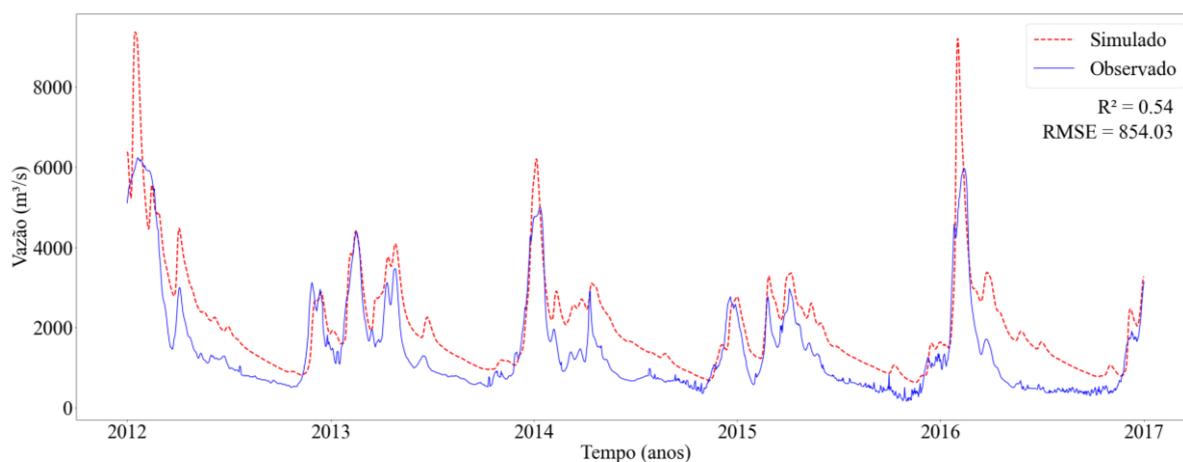


Figura 5.9 – Hidrograma da simulação do cenário RCP2.6-SSP1 para o ponto de controle em Itaparica.

Fonte: Autor.

Os valores do coeficiente de eficiência se encontram muito próximos do limite recomendado, tendo, inclusive, o ponto de controle em sobradinho assumido um valor levemente abaixo do limite de 0.5. Este comportamento sugere que os dados de solo dos cenários podem ser utilizados para a modelagem hidrológica na região com ressalva, sabendo que, de acordo com os hidrogramas apresentados na **Figura 5.7**, **Figura 5.8** e **Figura 5.9**, a simulação tende a superestimar a vazão.

5.3 Efeitos dos cenários na Precipitação

A aplicação das fórmulas apresentadas no item 4.4 resultou i. no fator 0,01, no cenário RCP 2.6, a ser multiplicado pelos dados de precipitação de 2010 a 2017 para se obter a projeção de chuva para 2045 a 2052; ii. No fator 0,01, no cenário RCP 2.6, a ser multiplicado pelos dados de precipitação de 2045 a 2052 para se obter a projeção de chuva para 2095 a 2102; iii. No fator 0,042, no cenário RCP 4.5, a ser multiplicado pelos dados de precipitação de 2010 a 2017 para se obter a projeção de chuva para 2045 a 2052; iv. No fator 0,054, no cenário RCP 4.5, a ser multiplicado pelos dados de precipitação de 2045 a 2052 para se obter a projeção de chuva para 2095 a 2102.

Existe, contudo, muita incerteza em se utilizar a taxa adotada como crescimento médio global anual para uma região em específico. Isso fica até mais evidente para uma área como a

bacia do São Francisco, que pelas suas dimensões, apresenta regime de precipitação diferente ao longo da bacia.

A taxa foi aplicada em um período de escassez hídrica, 2010 a 2017, que não necessariamente representa o padrão de comportamento de precipitação da bacia e essas condições foram levadas para o horizonte estudado.

A aplicação da taxa não considerou as variações intra-anuais de precipitação que podem ocorrer com o aquecimento global e os impactos no uso e cobertura do solo. Por exemplo, um crescimento de 20% pode significar que houve um aumento homogêneo de precipitação ao longo do ano, mas inserindo os fatores de risco mencionados, pode representar um período de seca mais longo, comprometendo usos como geração de energia, abastecimento, entre outros, e um período de chuvas muito mais intenso – e curto – que justifique os 20%. Isto pode conduzir a erros grosseiros, pois se a precipitação aumenta em todos os cenários, existe a possibilidade de se afirmar que em um cenário onde há amplo consumo de recursos não renováveis e maior pressão sobre recursos ambientais, ainda assim, a disponibilidade de água aumenta, pois não se está levando em conta períodos de seca e as alterações no tempo de retorno das chuvas.

Desta forma, recomenda-se realizar um estudo mais aprofundado das projeções de precipitação para os cenários SSP-RCP, como Qin *et al* (2021) fizeram através de modelos de circulação geral (GCMs), a fim de melhorar assim a simulação hidrológica.

5.4 Efeitos dos cenários no uso e ocupação do solo

Os usos do solo mais afetados pelas tendências de desenvolvimento socioambiental e econômico descritas em cada narrativa dos cenários SSP foram Cerrado, Caatinga e Agricultura. Em todos os cenários relacionados houve uma queda na área de cerrado. Observa-se também que em todos os cenários que houve um aumento expressivo de áreas destinadas a agricultura, houve queda na área de caatinga e bem discreta na área de floresta.

As áreas de floresta tiveram um leve aumento nos cenários SSP1, SSP4 e SSP5, onde há em algum grau uma gestão das questões ambientais, sendo que para o cenário RCP 4.5, este crescimento foi mais discreto.

Figura 5.10 – Gráficos de mudança, por cenário, na área dos usos da bacia

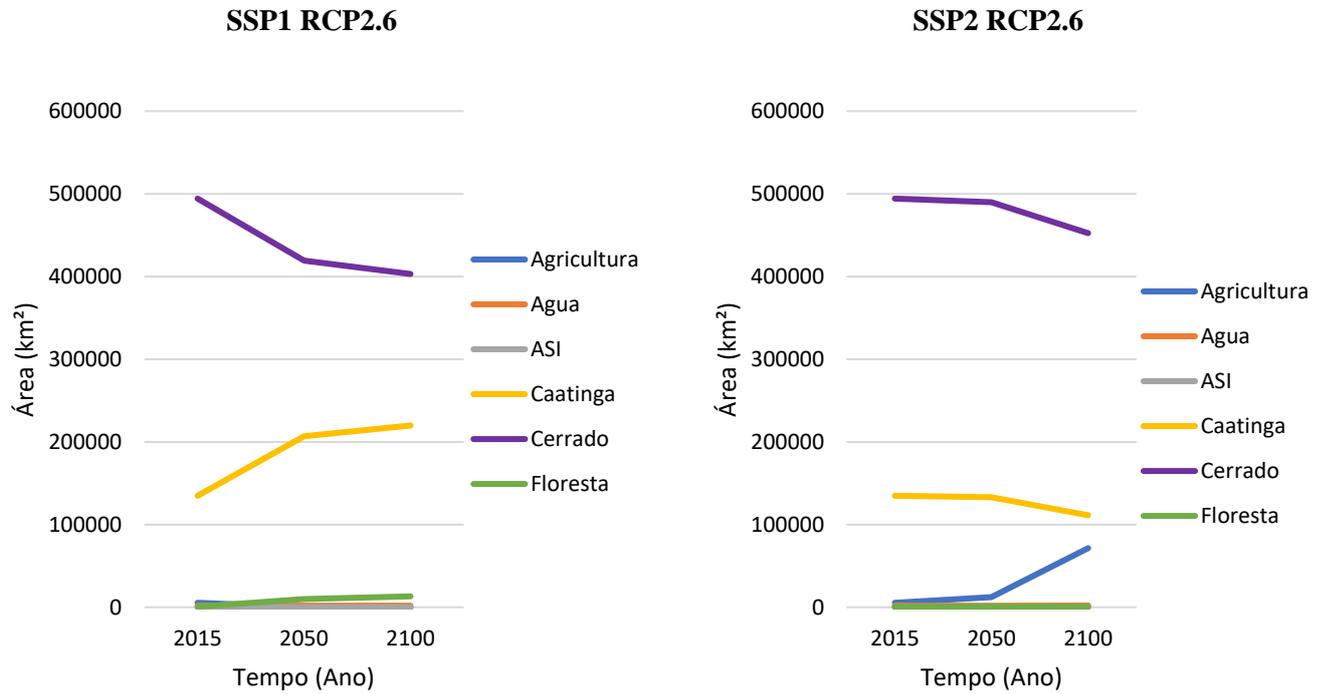
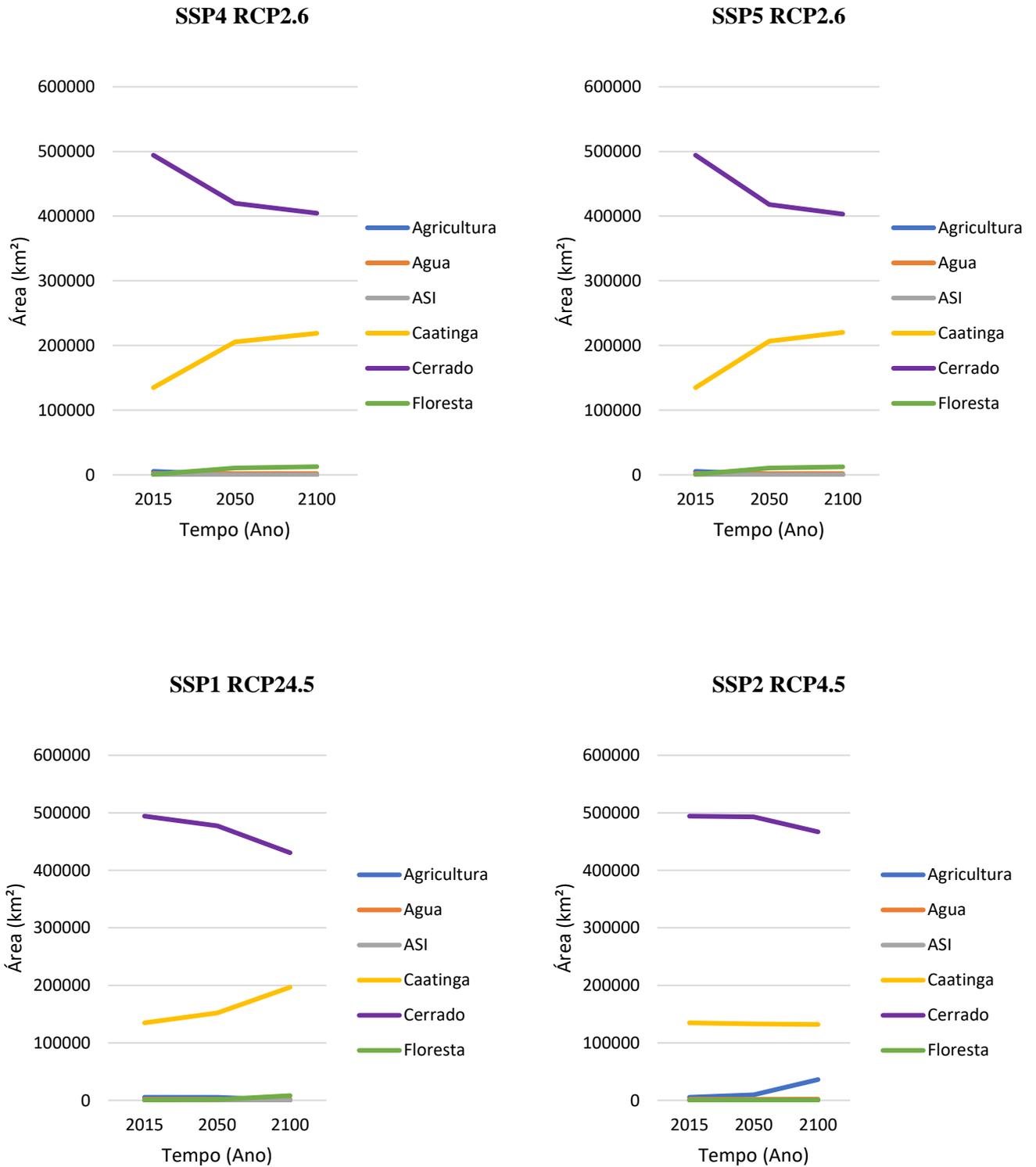
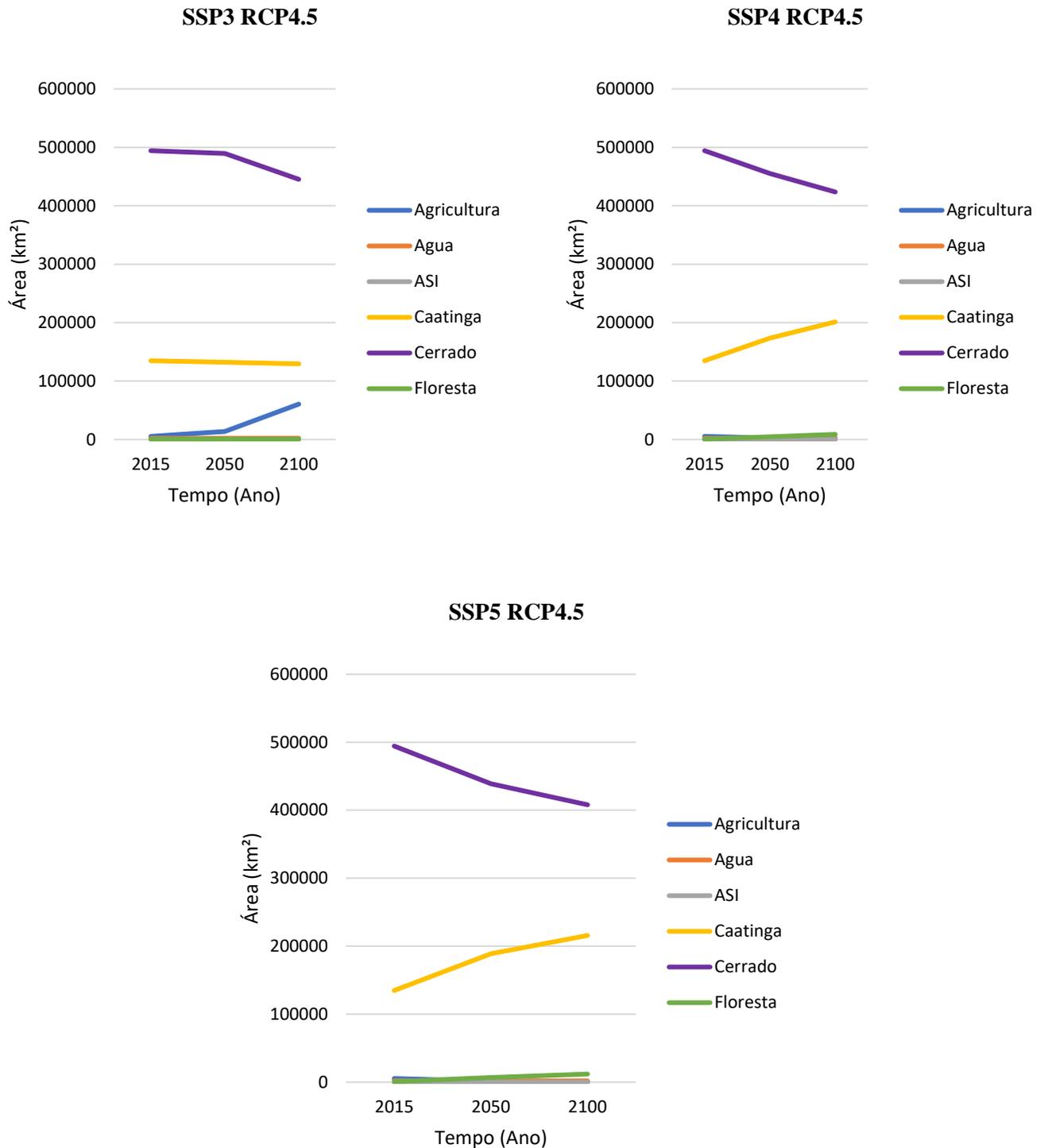


Figura 5.10 – Gráficos de mudança, por cenário, na área dos usos da bacia (Continuação)



**Figura 5.10 – Gráficos de mudança, por cenário, na área dos usos da bacia
(Continuação)**



5.5 Projeções de vazão para 2050 e 2100

O cenário SSP1, no qual o mundo assume um comportamento de sustentabilidade, em que a ênfase no crescimento econômico muda para uma ênfase mais ampla no bem-estar humano e o desenvolvimento respeita as fronteiras ambientais percebidas, apresentou um aumento de 3,8% na Q₉₀ e de 5,2% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 15,9% na Q₉₀ e 19,7% na mediana, para o ponto de controle em Retiro Baixo de 2015 a 2100.

Quadro 5.5 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP1-RCP2.6 e SSP1-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP1	RCP2.6 SSP1	RCP2.6 SSP1	RCP4.5 SSP1	RCP4.5 SSP1	RCP4.5 SSP1
Mínimo	33.15	34.83	35.09	33.15	35.40	39.45
Máximo	1511.11	1670.75	1727.16	1511.11	1656.01	2020.70
Média	130.25	135.73	138.89	130.25	140.61	158.28
Mediana	85.59	88.43	90.07	85.59	92.29	102.47
Q ₉₀	51.19	52.67	53.15	51.19	54.37	59.34

Fonte: Autor.

O cenário SSP2, no qual as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam acentuadamente e os desafios para reduzir a vulnerabilidade às mudanças sociais e ambientais permanecem, apresentou um aumento de 2,6% na Q₉₀ e de 3,3% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 14,2% na Q₉₀ e 17,9% na mediana, para o ponto de controle em Retiro Baixo de 2015 a 2100.

Quadro 5.6 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP2-RCP2.6 e SSP2-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP2	RCP2.6 SSP2	RCP2.6 SSP2	RCP4.5 SSP2	RCP4.5 SSP2	RCP4.5 SSP2
Mínimo	33.15	33.84	34.12	33.15	35.52	38.33
Máximo	1511.11	1539.84	1571.73	1511.11	1654.52	1862.65
Média	130.25	132.81	134.65	130.25	140.74	154.77
Mediana	85.59	87.46	88.45	85.59	92.41	100.87
Q ₉₀	51.19	52.11	52.54	51.19	54.48	58.45

Fonte: Autor.

O cenário SSP3 descreve um ambiente mundial de maiores dificuldades, de conflitos regionais levando os países a se concentrarem em questões internas, alto consumo, aumento das desigualdades e baixa prioridade internacional para lidar com as questões ambientais levando a forte degradação dos sistemas ambientais em algumas regiões. Neste cenário, não há dados para o RCP2.6, indicando que o mundo não conseguirá atingir suas metas. Portanto, para o cenário RCP 4.5, houve um aumento de 14,0% na Q₉₀ e de 3,3% na mediana para o ponto de controle em Retiro Baixo de 2015 a 2100.

Quadro 5.7 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP3-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.

Estatística	2015	2050	2100
	RCP4.5 SSP3	RCP4.5 SSP3	RCP4.5 SSP3
Mínimo	33.15	35.52	38.25
Máximo	1511.11	1654.52	1860.61
Média	130.25	140.74	154.52
Mediana	85.59	92.41	100.73
Q ₉₀	51.19	54.48	58.35

Fonte: Autor.

O cenário SSP4 é representado pela desigualdade entre países, com alto desenvolvimento de tecnologia e políticas ambientais se concentrando em questões locais nas áreas de média e alta renda. Neste cenário, a simulação apresentou um aumento de 3,9% na Q₉₀ e de 5,2% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 16,0% na Q₉₀ e 19,7% na mediana, para o ponto de controle em Retiro Baixo de 2015 a 2100.

Quadro 5.8 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP4-RCP2.6 e SSP4-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP4	RCP2.6 SSP4	RCP2.6 SSP4	RCP4.5 SSP4	RCP4.5 SSP4	RCP4.5 SSP4
Mínimo	33.15	34.83	35.11	33.15	35.75	39.49
Máximo	1511.11	1668.85	1723.61	1511.11	1784.90	2018.64
Média	130.25	135.58	138.71	130.25	142.56	158.24
Mediana	85.59	88.32	90.07	85.59	92.40	102.45
Q ₉₀	51.19	52.68	53.19	51.19	54.54	59.39

Fonte: Autor.

O cenário SSP5 é representado por desenvolvimento social e econômico com forte consumo de combustíveis fósseis. Ainda assim, a aposta deste cenário é de que com o desenvolvimento tecnológico, problemas ambientais locais são gerenciados com sucesso. Neste cenário, houve um aumento de 4,1% na Q_{90} e de 5,5% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 15,2% na Q_{90} e 19,7% na mediana, para o ponto de controle em Retiro Baixo de 2015 a 2100.

Quadro 5.9 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP5-RCP2.6 e SSP5-RCP4.5, para o ponto de controle em Retiro Baixo.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP5	RCP2.6 SSP5	RCP2.6 SSP5	RCP4.5 SSP5	RCP4.5 SSP5	RCP4.5 SSP5
Mínimo	33.15	34.76	35.24	33.15	27.10	39.22
Máximo	1511.11	1673.57	1731.65	1511.11	1725.78	2041.88
Média	130.25	135.78	139.21	130.25	130.68	159.20
Mediana	85.59	88.39	90.29	85.59	81.14	102.46
Q_{90}	51.19	52.58	53.31	51.19	45.77	58.95

Fonte: Autor.

O cenário SSP1 para o ponto de controle em Sobradinho, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 3,8% na Q_{90} e de 5,2% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 9,1% na Q_{90} e 11,0% na mediana.

Quadro 5.10 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP1-RCP2.6 e SSP1-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP1	RCP2.6 SSP1	RCP2.6 SSP1	RCP4.5 SSP1	RCP4.5 SSP1	RCP4.5 SSP1
Mínimo	33.15	34.83	35.09	33.15	35.40	39.45
Máximo	1511.11	1670.75	1727.16	1511.11	1656.01	2020.70
Média	130.25	135.73	138.89	130.25	140.61	158.28
Mediana	85.59	88.43	90.07	85.59	92.29	102.47
Q_{90}	51.19	52.67	53.15	51.19	54.37	59.34

Fonte: Autor.

O cenário SSP2 para o ponto de controle em Sobradinho, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 2,6% na Q_{90} e de 3,3% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 15,9% na Q_{90} e 19,7% na mediana.

Quadro 5.11 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP2-RCP2.6 e SSP2-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP2	RCP2.6 SSP2	RCP2.6 SSP2	RCP4.5 SSP2	RCP4.5 SSP2	RCP4.5 SSP2
Mínimo	33.15	33.84	34.12	33.15	35.52	38.33
Máximo	1511.11	1539.84	1571.73	1511.11	1654.52	1862.65
Média	130.25	132.81	134.65	130.25	140.74	154.77
Mediana	85.59	87.46	88.45	85.59	92.41	100.87
Q ₉₀	51.19	52.11	52.54	51.19	54.48	58.45

Fonte: Autor.

O cenário SSP3-RCP4.5 para o ponto de controle em Sobradinho, de 2015 a 2100, apresentou um aumento foi de 14,0% na Q₉₀ e 17,7% na mediana.

Quadro 5.12 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP3-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.

Estatística	2015	2050	2100
	RCP4.5 SSP3	RCP4.5 SSP3	RCP4.5 SSP3
Mínimo	33.15	35.52	38.25
Máximo	1511.11	1654.52	1860.61
Média	130.25	140.74	154.52
Mediana	85.59	92.41	100.73
Q ₉₀	51.19	54.48	58.35

Fonte: Autor.

O cenário SSP4 para o ponto de controle em Sobradinho, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 3,9% na Q₉₀ e de 5,2% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 16,0% na Q₉₀ e 19,7% na mediana.

Quadro 5.13 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP4-RCP2.6 e SSP4-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP4	RCP2.6 SSP4	RCP2.6 SSP4	RCP4.5 SSP4	RCP4.5 SSP4	RCP4.5 SSP4
Mínimo	33.15	34.83	35.11	33.15	35.75	39.49
Máximo	1511.11	1668.85	1723.61	1511.11	1784.90	2018.64
Média	130.25	135.58	138.71	130.25	142.56	158.24
Mediana	85.59	88.32	90.07	85.59	92.40	102.45
Q ₉₀	51.19	52.68	53.19	51.19	54.54	59.39

Fonte: Autor.

O cenário SSP5 para o ponto de controle em Sobradinho, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 4,1% na Q₉₀ e de 5,5% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 15,2% na Q₉₀ e 19,7% na mediana.

Quadro 5.14 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP5-RCP2.6 e SSP5-RCP4.5, para o ponto de controle em Sobradinho.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP5	RCP2.6 SSP5	RCP2.6 SSP5	RCP4.5 SSP5	RCP4.5 SSP5	RCP4.5 SSP5
Mínimo	33.15	34.76	35.24	33.15	27.10	39.22
Máximo	1511.11	1673.57	1731.65	1511.11	1725.78	2041.88
Média	130.25	135.78	139.21	130.25	130.68	159.20
Mediana	85.59	88.39	90.29	85.59	81.14	102.46
Q ₉₀	51.19	52.58	53.31	51.19	45.77	58.95

Fonte: Autor.

O cenário SSP1 para o ponto de controle em Itaparica, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 3,8% na Q₉₀ e de 5,2% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 15,9% na Q₉₀ e 19,7% na mediana.

Quadro 5.15 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP1-RCP2.6 e SSP1-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP1	RCP2.6 SSP1	RCP2.6 SSP1	RCP4.5 SSP1	RCP4.5 SSP1	RCP4.5 SSP1
Mínimo	33.15	34.83	35.09	33.15	35.40	39.45
Máximo	1511.11	1670.75	1727.16	1511.11	1656.01	2020.70
Média	130.25	135.73	138.89	130.25	140.61	158.28
Mediana	85.59	88.43	90.07	85.59	92.29	102.47
Q ₉₀	51.19	52.67	53.15	51.19	54.37	59.34

Fonte: Autor.

O cenário SSP2 para o ponto de controle em Itaparica, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 2,6% na Q₉₀ e de 3,3% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 14,2% na Q₉₀ e 17,9% na mediana.

Quadro 5.16 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP2-RCP2.6 e SSP2-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP2	RCP2.6 SSP2	RCP2.6 SSP2	RCP4.5 SSP2	RCP4.5 SSP2	RCP4.5 SSP2
Mínimo	33.15	33.84	34.12	33.15	35.52	38.33
Máximo	1511.11	1539.84	1571.73	1511.11	1654.52	1862.65
Média	130.25	132.81	134.65	130.25	140.74	154.77
Mediana	85.59	87.46	88.45	85.59	92.41	100.87
Q ₉₀	51.19	52.11	52.54	51.19	54.48	58.45

Fonte: Autor.

O cenário SSP3 para o ponto de controle em Itaparica, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 14,0% na Q₉₀ e de 17,7% na mediana para o cenário RCP 4.5.

Quadro 5.17 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP3-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.

Estatística	2015	2050	2100
	RCP4.5 SSP3	RCP4.5 SSP3	RCP4.5 SSP3
Mínimo	33.15	35.52	38.25
Máximo	1511.11	1654.52	1860.61
Média	130.25	140.74	154.52
Mediana	85.59	92.41	100.73
Q ₉₀	51.19	54.48	58.35

Fonte: Autor.

O cenário SSP4 para o ponto de controle em Itaparica, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 3,9% na Q₉₀ e de 5,2% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 16,0% na Q₉₀ e 19,7% na mediana.

Quadro 5.18 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP4-RCP2.6 e SSP4-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.

Estatística	2015	2050	2100	2015	2050	2100
	RCP2.6 SSP4	RCP2.6 SSP4	RCP2.6 SSP4	RCP4.5 SSP4	RCP4.5 SSP4	RCP4.5 SSP4
Mínimo	33.15	34.83	35.11	33.15	35.75	39.49
Máximo	1511.11	1668.85	1723.61	1511.11	1784.90	2018.64
Média	130.25	135.58	138.71	130.25	142.56	158.24
Mediana	85.59	88.32	90.07	85.59	92.40	102.45
Q ₉₀	51.19	52.68	53.19	51.19	54.54	59.39

Fonte: Autor.

O cenário SSP5 para o ponto de controle em Itaparica, de 2015 a 2100, apresentou um aumento de 4,1% na Q_{90} e de 5,5% na mediana para o cenário RCP 2.6. Já para o cenário RCP 4.5, o aumento foi de 15,2% na Q_{90} e 19,7% na mediana.

Quadro 5.19 – Estatística descritiva, anual, das séries de vazão para os cenários SSP5-RCP2.6 e SSP5-RCP4.5, para o ponto de controle em Itaparica.

	2015	2050	2100	2015	2050	2100
Estatística	RCP2.6 SSP5	RCP2.6 SSP5	RCP2.6 SSP5	RCP4.5 SSP5	RCP4.5 SSP5	RCP4.5 SSP5
Mínimo	33.15	34.76	35.24	33.15	27.10	39.22
Máximo	1511.11	1673.57	1731.65	1511.11	1725.78	2041.88
Média	130.25	135.78	139.21	130.25	130.68	159.20
Mediana	85.59	88.39	90.29	85.59	81.14	102.46
Q_{90}	51.19	52.58	53.31	51.19	45.77	58.95

Fonte: Autor.

O cenário SSP2-RCP2.6 foi o mais crítico identificado, com 2,6% de aumento da Q_{90} , enquanto que os cenários SSP1-RCP4.5 e SSP4-RCP4.5 apresentaram maior disponibilidade, com valores praticamente iguais, respectivamente 15,9% e 16,0 % de crescimento da Q_{90} .

Analisando os cenários SSP apenas no cenário RCP 2.6, isto é, sob as mesmas condições de crescimento de precipitação, o cenário mais crítico identificado foi o SSP2 (2,6% da Q_{90}) como já citado, mas o de maior disponibilidade foi o SSP5 (4,1% da Q_{90}).

Analisando os cenários SSP, apenas no cenário RCP 4.5, o cenário mais crítico identificado foi o SSP3 (13,9% da Q_{90}), e o de maior disponibilidade foi o SSP4 (16,0% da Q_{90}). Isto significa que se a humanidade gerenciar bem as emissões (RCP 2.6), mas mantiver a tendência atual de modo de vida (SP2), a disponibilidade será menor que nos demais cenários. Por outro lado, se o montante de emissões não for reduzido (RCP 4.5), a disponibilidade será mais crítica no cenário em que há maior degradação ambiental (SSP3).

Vale citar que o cenário SSP5 apresentou maior aumento da Q_{90} que o cenário SSP1. No cenário SSP1, é falado em comportamento sustentável e desenvolvimento do bem estar humano. A narrativa parece conduzir a um caminho de freio no comportamento e não em resolução dos problemas já existentes. Já no cenário SSP5, mesmo havendo um amplo apelo ao desenvolvimento econômico e uso intensivo de energia e combustíveis fósseis, a aposta é de que a tecnologia é utilizada ativamente, e com sucesso, para resolver os problemas ambientais.

Os resultados sugerem que apenas frear o modo de consumo atual não é tão eficiente para se ter uma melhora na disponibilidade hídrica quanto utilizar de maneira mais agressiva os recursos tecnológicos e gerenciais para melhorar e recuperar os sistemas ambientais. Esta análise deve ser interpretada da seguinte maneira: a tecnologia pode ser um fator de suma importância para gerenciar as questões ambientais, contudo, é preciso frear o modo de vida da humanidade, assumindo um comportamento mais sustentável, isto é, um mundo equilibrado pode advir da união entre sustentabilidade e tecnologia.

6 CONCLUSÕES

As projeções de vazão de acordo com os cenários RCP-SSP na modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do rio São Francisco foram realizadas utilizando o banco de dados de uso e cobertura do solo proveniente do modelo Demeter. A simulação utilizando estes dados para o ano de 2015 resultou em R^2 em torno do limite 0,5 recomendado, sugerindo que é possível utilizar os dados de uso e cobertura do solo, mas com ponderação, sabendo que a simulação pode não representar tão bem as condições das projeções, superestimando a vazão. Espera-se encontrar resultados da modelagem hidrológica mais eficientes utilizando modelos de circulação geral para projeção de precipitação.

O cenário mais crítico, isto é, com menor disponibilidade de água nos rios foi o SSP2-RCP2.6 com aumento da Q_{90} de 2,6%, isto é, de 51,19 m³/s para 52,54 m³/s. O cenário de maior disponibilidade foi o SSP4-RCP4.5, com aumento da Q_{90} de 16 %, isto é, de 51,19 m³/s para 59,39 m³/s.

Os resultados sugerem que se a humanidade gerenciar bem as emissões de carbono (RCP 2.6), mas mantiver a tendência atual de modo de vida (SP2), a disponibilidade será menor que nos demais cenários. Por outro lado, se o montante de emissões não for reduzido (RCP 4.5), a disponibilidade será mais crítica no cenário em que há maior degradação ambiental (SSP3). É possível concluir ainda que apenas frear o modo de consumo atual não é tão eficiente para se ter uma melhora na disponibilidade hídrica, quanto utilizar de maneira mais agressiva os recursos tecnológicos e gerenciais para melhorar e recuperar os sistemas ambientais.

É esperado que estes resultados possam contribuir para a gestão de recursos hídricos do país fornecendo um padrão de cenarização que permita, inclusive, inserir os gestores no contexto global das descobertas mais recentes da comunidade científica acerca das mudanças climáticas, inserindo-as em seu planejamento de médio e longo prazo.

REFERÊNCIAS

- ADUAH, M. S.; JEWITT, G. P. W.; TOUCHER, M. L. W.. **Assessing Impacts of Land Use Changes on the Hydrology of a Lowland Rainforest Catchment in Ghana, West Africa.** *Water*, v.10, p.9, 2018.
- ALBUQUERQUE, F.A.. **Estudos hidrológicos em microbacias com diferentes usos do solo na sub-bacia do alto Natuba-PE.** Dissertação de mestrado, UFPE, Recife, 2010.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J.D.. **A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.** *Journal of Hydrology*, v. 55, p. 3-23, 1982.
- CARVALHO, W. M.. **HydroBr:** A Python package to work with Brazilian hydrometeorological time series. (Version 0.1.1). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3931027>. 2020.
- CBHSF. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco:** Apresentação do PRH-SF 2016-2025. 2016.
- CHEN, C.J.; CHEN, C.C.; LO, M.H.; JUANG, J.Y.; CHANG, C.M.. **Central Taiwan's hydroclimate in response to land use/cover change.** *Environmental Research Letters*. 2020.
- CHEN, M.; VERNON, C.R.; GRAHAM, N.T.; HEJAZI, M.; HUANG, M.; CHENG, Y; CALVIN, K.. **Global land use for 2015–2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios.** *Nature*, V. 7, N. 320, 2020.
- COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L.. **The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil.** *Biogeochemistry*, v. 105, pp. 119–131, 2011.
- COLLISCHONN, W.. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** Tese de doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- ESPÍRITO-SANTO, M. M.; LEITE, M. E.; SILVA, J. O.; BARBOSA, R. S.; ROCHA, A. M.; ANAYA, F. C.; DUPIN, M. G. V.. **Understanding patterns of land-cover change in the**

Brazilian Cerrado from 2000 to 2015. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 371, n. 1703, doi:10.1098/rstb.2015.0435, 2016.

FAN, F.M.; BUARQUE, D.C.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W.. **Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul.** XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, 2015.

FENTA, A. A.; YASUDA, H.; HAREGEWEYN, N.; BELAY, A. S.; HADUSH, Z.; GEBREMEDHIN, M. A.; MEKONNEN, G.. **The dynamics of urban expansion and land use/land cover changes using remote sensing and spatial metrics: the case of Mekelle City of northern Ethiopia.** International Journal of Remote Sensing, v. 38, n.14, pp. 4107–4129, 2017.

FRAGOSO Jr., C. R.; FERREIRA, T. F.; MARQUES, D. M.. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos.** Oficina de textos, São Paulo, 2009.

GARG, V.; AGGARWAL, S. P.; GUPTA, P. K.; NIKAM, B. R.; THAKUR, P. K.; SRIVASTAV, S. K.; KUMAR, A. S.. **Assessment of land use land cover change impact on hydrological regime of a basin.** Environ Earth Sci, v.76, p.635, 2017.

GARG, V.; NIKAM, B. R.; THAKUR, P. K.; AGGARWAL, S. P.; GUPTA, P. K.; SRIVASTAV, S. K.. **Human-induced land use land cover change and its impact on hydrology.** HydroResearch v. 1, pp. 48–56, 2019.

GERMER, S.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEER, H. **Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: Undisturbed forest to pasture.** Journal of Hydrology, v.380, pp. 473-480, 2010.

GOLMOHAMMADI, G.; PRASHER, S.; MADANI, A.; RUDRA, R. **Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT.** Hydrology, v.1, n.1, pp.20–39, 2014).

GUIMARÃES, G. M. **Análise da previsibilidade de cheias na bacia do rio Uruguai através do Modelo MGB-IPH.** 2018.174 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

HASSABALLAH, K.; MOHAMED, Y.; UHLENBROOK, S.; BIRO, K.. **Analysis of streamflow response to land use and land cover changes using satellite data and hydrological modelling**: case study of Dinder and Rahad tributaries of the Blue Nile (Ethiopia–Sudan). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v.21, pp. 5217–5242, 2017.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. **Climate Change 2013**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. **Summary for policymakers**. In: *Climate Change 2014: 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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32, 2014.

JARDIM, P. F.; FLEISCHMANN, A. S.; PELINSON, D.; OLIVEIRA, A. M.; SIQUEIRA, V. A.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.. **Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB-IPH 2017 utilizando o IPH-Hydro Tools**. UFRGS, 2017.

JIANG, X.; ZHAI, S.; LIU, H.; CHEN, J.; ZHU, Y.; WANG, Z.. **Multi-scenario simulation of production-living-ecological space and ecological effects based on shared socioeconomic pathways in Zhengzhou, China**. *Ecological Indicators*, n. 137, 2022.

LI, S.; YANG, H.; LACAYO, M.; LIU, J.; LEI, G.. **Impacts of Land-Use and Land-Cover Changes on Water Yield: A Case Study in Jing-Jin-Ji, China**. *Sustainability*, v. 10, p. 960, 2018.

LU, Y.; WU, P.; MA, X.; LI, X.. **Detection and prediction of land use/land cover change using spatiotemporal data fusion and the Cellular Automata–Markov model**. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 2, 2019.

MCCUEN, R. H.; KNIGHT, Z.; CUTTER, A. G.. **Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index**. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.11, n.6, pp.597–602, 2006.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Secretaria de Recursos, Brasília, 2006.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P.. **Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria**. *Transactions of the ASABE*, v. 58, n. 6, pp. 1763-1785, 2015.

NGUYEN, L. H.; JOSHI, D. R.; CLAY, D. E.; HENEGBRY, G. M. **Characterizing land cover/land use from multiple years of Landsat and MODIS time series: A novel approach using land surface phenology modeling and random forest classifier**. *Remote Sensing of Environment*, 2018.

NÄSCHEN, K.; DIEKKRÜGER, B.; EVERS, M.; HÖLLERMANN, B.; STEINBACH, S.; THONFELD, F.. **The Impact of Land Use/Land Cover Change (LULCC) on Water Resources in a Tropical Catchment in Tanzania under Different Climate Change Scenarios**. *Sustainability*, v. 11, 2019.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V.. **River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles**. *Journal of Hydrology*, v.10, n.3, pp.282–290, 1970.

NETO, R. L. B.; TAGLIAFERRE, C.; LEMOS, O. L. L.; ROCHA, F. A.; de PAULA, A.. **Aplicação do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo**. *Ciência Florestal*. Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 191-21, 2021. <https://doi.org/10.5902/1980509836095>.

NÓBREGA, R. S.. **Modelagem de impactos do desmatamento nos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Jamari (RO) utilizando dados de superfície e do TRMM**. Tese de doutorado. Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

OLIVEIRA, V. A. MELLO, C. R. VIOLA, M. R., SRINIVASAN, R.S. **Land-use change impacts on the hydrology of the upper grande river basin, Brazil**. *CERNE*, v. 24, n. 4, p. 334-343, 2018.

PIELKE, R. A.; ADEGOKE, J.; BELTRAN-PRZEKURAT, A.; HIEMSTRA, C. A.; LIN, J.; NAIR, U. S.; NIYOGE, D.; NOBIS, T. E.. **An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall.** *Tellus*, v. 59B, pp. 587–601, 2007.

POPP, A., CALVIN, K., FUJIMORI, S., HAVLIK, P., HUMPENÖDER, F., STEHFEST, E., BODIRSKY, B. L.; DIETRICH, J. F.; DOELMANN, J. C.; GUSTI, M.; HASEGAWA, T.; KYLE, P.; OBERSTEINER, M.; TABEA, A.; TAKAHASHI, K.; VALIN, H.; WALDHOFF, S.; WEINDL, I.; WISE, M.; KRIEGLER, E.; LOTZE-CAMPEN, H.; FRICKO, O.; RIAHI, K.; VANVUUREN, D. P.. **Land-use futures in the shared socio-economic pathways.** *Global Environmental Change*, v.42, pp.331–345, 2016.

QIN, J.; SU, B.; TAO, H.; WANG, Y.; HUANG, J.; JIANG, T. **Projection of temperature and precipitation under SSPs-RCPs Scenarios over northwest China.** *Front. Earth Sci.* 15, 23–37. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11707-020-0847-8>

RAMINA, R. H.. **Consultoria e assessoria presencial especializada para estudo das vazões reduzidas em caráter emergencial no rio São Francisco a partir da UHE sobradinho e proposição de alternativas que garantam o uso múltiplo das águas - Produto 1: Concepção de uma estratégia robusta para a gestão dos usos múltiplos das águas na bacia hidrográfica do rio São Francisco.** CBHSF/AGB PEIXE VIVO. 2014.

RIAHI, K.; VAN VUUREN, D.P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B.C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J.C.; SAMIR, K.C, LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLÍK, P.; HUMPENÖDER, F.; DA SILVA, L.A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J.C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M.. **The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview.** *Global Environmental Change*, v. 42, pp. 153-168, ISSN 0959-3780, DOI:110.1016/j.gloenvcha.2016.05.009, 2016.

RODRIGUES, E. L.. **Avaliação da produção de água (vazão), em função de alterações de uso do solo e da implantação de florestas de eucalipto em larga escala na bacia do Rio Pará - Alto São Francisco/MG.** Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 2013.

SANTOS, C. P. **Impactos eco-hidrológicos do uso e ocupação do solo em região semiárida: o caso da bacia do rio acaraú, CE.** Dissertação de mestrado. UFAL, 2013.

SAHIN, V.; HALL, M. J. **The effects of afforestation and deforestation on water yields.** *Journal of Hydrology*, v. 178, n. 1-4, p. 293–309, abr. 1996.

SILVA, B.C. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio são Francisco.** Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre, 2005.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M; COLLISCHONN, W. **Previsão de vazão de longo prazo na bacia do Rio São Francisco II: Ajuste do modelo hidrológico.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, 13p. 2005.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. **Previsão Hidroclimática de Vazão de Curto Prazo na Bacia do Rio São Francisco.** *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos* V.12, n.3, pp.31-41, 2007.

SILVA, V. P. R.; SILVA, M. T.; SOUZA, E. P.. **Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of the são francisco river basin.** *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, v.36, n.6, pp.1005-1015, 2016.

SILVA, V. P. R. S.; SILVA, M. T.; SINGH, V. P.; SOUZA, E. P.; BRAGA, C. C.; HOLANDA, R. M.; ALMEIDA, R. S. R.; SOUSA, F. A. S.; BRAGA, A. C. R.. **Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin.** *CATENA*, v. 162, pp. 166–176, 2018.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. **Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America-annotated.** *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 22, pp. 4815–4842, 2018.

SLEETER, B. M.; SOHL, T. L.; BOUCHARD, M. A.; REKER, R. R.; SOULARD, C. E.; ACEVEDO, W.; GRIFFITH, G. E.; SLEETER, R. R.; AUCH, R. F.; SLAYER, K. L.;

PRISLEY, S.; ZHU, Z. **Scenarios of land use and land cover change in the conterminous United States:** Utilizing the special report on emission scenarios at ecoregional scales. *Global Environmental Change*, v.22, n.4, pp.896–914, 2012.

SORRIBAS, M. V.; PAIVA, R. C. D.; MELACK, J. M.; BRAVO, J. M.; JONES, C.; CARVALHO, L.; BEIGHLEY, E.; FORSBERG, B.; COSTA, M. H.. **Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin.** *Climatic Change*, v.136, pp. 555–570, 2016.

TANG, Z.; ENGEL, B. A.; LIM, K. J.; PIJANOWSKI, B. C.; HARBOR, J. **Minimizing the impact of urbanization on long term runoff.** *Journal of the American Water Resources Association*, v. 41, p. 1347-1359, 2005.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão.** *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 1, p. 135-152, jan./jun. 1997.

TUCCI, C. E. M.. **Hidrologia:** Ciência e Aplicação. Porto Alegre, Editora da Universidade-ABRH-EPUSP, 2ª ed., 2001.

TUCCI, C. E. M.. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre, ABRH, 2ª ed., 2005.

UCAR. **Understanding the hydrologic cycle.** COMET program, University Corporation for Atmospheric Research's (UCAR's), 2010. Disponível em: <https://www.met.edu/ucar/education/training_module.php?id=849&tab=01#>. Acesso em 24/03/2020.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. **The representative concentration pathways: an overview.** *Climatic Change*, v. 109, pp. 5–31, 2011.

VIEIRA, L. L. A.. **Efeitos de alterações de uso e ocupação do solo e de mudanças climáticas sobre o escoamento superficial na bacia experimental de Santana do Ipanema – Alagoas.** Dissertação de mestrado. Maceió, PPGRHS-UFAL, 2011.

WANG, T.; SUN, F. **Global gridded GDP data set consistent with the shared socioeconomic pathways.** *Nature*, 9, 221 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01300-x>

WOLDESENBET, T.A.; ELAGIB, N.A.; RIBBE, L.; HEINRICH, J.. **Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia.** *Sci. Total Environ*, v. 575, pp. 724–741, 2016.

YAO, L.; ZHOU, H.; YAN, Y; LI, L.; SU, Y.. **Projection of hydrothermal condition in Central Asia under four SSP-RCP scenarios.** *J. Arid Land* 14, 521–536 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s40333-022-0094-9>.