



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – UFPE

VAGNER DE SOUZA FELIX

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS DO  
CLIMA E USO DA TERRA NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PAJEÚ E  
CAPIBARIBE**

RECIFE – PE

2023

VAGNER DE SOUZA FELIX

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS DO  
CLIMA E USO DA TERRA NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PAJEÚ E  
CAPIBARIBE**

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Tecnologia ambiental e recursos hídricos

**Orientador:** Dr. Alfredo Ribeiro Neto

RECIFE – PE

2023

## Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Felix, Vagner de Souza.

Modelagem hidrológica de cenários futuros de mudanças do clima e uso da terra nas Bacias Hidrográficas dos rios Pajeú e Capibaribe / Vagner de Souza Felix. - Recife, 2023.  
138f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologias e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2023.

Orientação: Alfredo Ribeiro Neto.

Inclui referências e anexo.

1. Cenários de uso da terra; 2. Impactos das mudanças climáticas; 3. Semiárido. I. Ribeiro Neto, Alfredo. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**VAGNER DE SOUZA FELIX**

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS FUTUROS DE  
MUDANÇAS DO CLIMA E USO DA TERRA NAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PAJEÚ E CAPIBARIBE**

Tese em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 18/08/2023

Orientador: Prof. Dr. Aldrefo Ribeiro Neto – UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Joel Silva dos Santos (examinador externo)  
Universidade Federal da Paraíba

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Richarde Marques da Silva (examinador externo)  
Universidade Federal da Paraíba

Participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josiclêda Domiciano Galvínio (examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco



---

Emitido em 22/08/2023

**APROVACAO DA BANCA Nº 187/2023 - PPGEC (11.65.18)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 22/08/2023 14:38 )*

ALFREDO RIBEIRO NETO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEPECA (11.65.60)  
Matrícula: ###888#1

*(Assinado digitalmente em 22/08/2023 11:13 )*

ARTUR PAIVA COUTINHO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
NT-CAA (12.33.05)  
Matrícula: ###869#2

*(Assinado digitalmente em 22/08/2023 11:12 )*

JOSE ROBERTO GONCALVES DE AZEVEDO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEPECA (11.65.60)  
Matrícula: ###306#2

*(Assinado digitalmente em 23/08/2023 16:27 )*

JOSICLEDA DOMICIANO GALVINCIO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEPCG (11.51.46)  
Matrícula: ###108#0

Visualize o documento original em <http://sipac.ufpe.br/documentos/> informando seu número: **187**, ano: **2023**, tipo:

**APROVACAO DA BANCA**, data de emissão: **22/08/2023** e o código de verificação: **51cf876e99**

Dedico este trabalho ao Meu Pai

**José Ribamar Felix**

*(in memoriam)*

E à minha mãe

**Miriam Martha de Souza Felix**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por esta oportunidade, por cuidar sempre da minha vida e pelas incontáveis segundas chances.

Agradeço imensamente ao Professor Dr. Alfredo Ribeiro Neto por ter me orientado durante todo o doutorado, pela sua paciência e por me oferecer as melhores condições possíveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à minha família pelo apoio e força para concluir mais essa etapa em minha vida; Em particular, ao meu irmão Vinícius por me ajudar diversas vezes na preparação e na organização dos dados da presente pesquisa; e à minha mãe que sempre se orgulhou por eu ter seguido a carreira acadêmica.

Agradeço ao meu tio Ernandes, à minha tia Margarida e ao meu primo Henrique pelo suporte dado no primeiro ano do Doutorado.

Agradeço aos professores, Dr. Évio Mello, Dr. Anderson Alves, Dr. Joel Silva dos Santos e ao Dr. Adriano Rolim da Paz, por me auxiliarem no início da minha trajetória acadêmica até os dias de hoje. Vocês são referências para mim.

Não poderia me esquecer de expressar minha gratidão aos professores componentes da minha banca de defesa desta tese, contribuindo para a minha evolução profissional: Dr. Joel Silva dos Santos, Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo, Dra. Josiclêda Domiciano Galvínio, Dr. Richarde Marques da Silva e Dr. Artur Coutinho Paiva.

O presente trabalho foi realizado com apoio da  
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -  
Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Por isso, agradeço a CAPES.

E por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, me auxiliaram durante os vários anos de doutorado. Sou grato, inclusive, pelo que não deu certo, pois me fez evoluir e ser quem eu sou hoje.

## RESUMO

Esta pesquisa teve o objetivo de analisar a influência de cenários futuros de clima e *LULC* (do inglês, *land use and land cover*) nas bacias hidrográficas do rio Pajeú/PE e do rio Capibaribe/PE em relação ao regime de vazão e de processos hidrológicos. Para tanto, foi utilizado o modelo hidrológico *MGB-IPH*. Os cenários climáticos futuros adotados foram as projeções do modelo climático regional *Eta/CPTEC* aninhado aos de circulação global (cenário *RCP 4.5*). Os cenários futuros *LULC* foram definidos com a utilização do modelo *Land Change Modeler*, tendo como ponto de partida as classificações de cobertura vegetal e o uso e a ocupação da terra, desenvolvidos pelo projeto *Mapbiomas*. Desse modo, dois foram os cenários *LULC* desenvolvidos para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, o cenário 1 (transição de caatinga e pastagem para agricultura) e o cenário 2 (caatinga para pastagem e agricultura). Para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, os cenários *LULC* futuros foram cenário 1 (transição de vegetação caatinga para pastagem e agricultura) e o cenário 2 (transição de caatinga e floresta para agricultura). Para ambas as bacias hidrográficas, foi considerado o mapa *LULC* referente ao ano de 1985 como referência para comparação dos resultados. O modelo hidrológico foi calibrado manualmente, considerando assim um único conjunto de parâmetros para ambas as bacias hidrográficas, sendo considerada a URH também referente ao ano de 1985. O coeficiente de Nash-Sutcliffe variou de 0,70 a 0,79 na calibração e de 0,81 a 0,89 na validação na modelagem da bacia hidrográfica do rio Pajeú. Na calibração do modelo para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, houve variação de 0,58 a 0,88 e na validação variou de 0,09 a 0,90. Posteriormente, o modelo foi rodado para o período de 1961 a 1990 (período baseline) e para o período de 2041 a 2070, levando em conta dados climatológicos dos cenários futuros. Os resultados mostraram que a parametrização do modelo pode influenciar no aumento ou redução dos volumes de vazão e nos processos hidrológicos em relação aos cenários *LULC*. Houve diminuição significativa na vazão de cheia ( $Q_{10}$ ), na rodada do *MGB-Eta-MIROC* para a bacia hidrográfica do Pajeú e do Capibaribe. A rodada *MGB-Eta-BESM* projeta considerável elevação da  $Q_{10}$  para ambas as bacias hidrográficas, porém com volumes mais semelhantes. A rodada *MGB-Eta-CANESM* projeta diminuição da vazão de cheia para as duas bacias hidrográficas, porém com magnitude maior para o Capibaribe. A rodada *MGB-Eta-HADGEM* prevê elevação da  $Q_{10}$  e significativa diminuição da  $Q_{90}$  para o Pajeú e diminuição da  $Q_{10}$  e  $Q_{90}$  para o Capibaribe. Em relação à  $Q_{90}$ , a rodada *MGB-Eta-HADGEM* é a que apresentou maiores volumes de vazão para o Pajeú. Por fim, embora as previsões sejam divergentes, em qualquer cenário climático futuro o impacto das mudanças climáticas poderá afetar as atividades humanas e o meio ambiente.

**Palavras-chave:** cenários de uso da terra; impactos das mudanças climáticas; semiárido.

## ABSTRACT

This research aimed to analyze the influence of future scenarios of climate and *LULC* (land use and land cover) in the watersheds of the Pajeú river and the Capibaribe river in relation to the flow regime and hydrological processes. For this purpose, the MGB-IPH hydrological model was used. The adopted future climate scenarios were the projections of the *Eta/CPTEC* regional climate model nested to global circulation models (scenario RCP 4.5). Future *LULC* scenarios were defined using the Land Change Modeler, based on the classifications of vegetation cover and land use developed by the Mapbiomas project. Thus, two *LULC* scenarios were developed for the Pajeú river basin, scenario 1 (transition from caatinga and pasture to agriculture) and scenario 2 (caatinga to pasture and agriculture). For the Capibaribe river basin, the future *LULC* scenarios were scenario 1 (transition from caatinga vegetation to pasture and agriculture) and scenario 2 (transition from caatinga and forest to agriculture). For both watersheds, the *LULC* map referring to the year 1985 was considered as a reference for comparing the results. The hydrological model was manually calibrated considering a single set of parameters for both watersheds, therefore, considering the HRU for the year 1985. The Nash-Sutcliffe coefficient ranged from 0.70 to 0.79 in the calibration and from 0.81 to 0.89 in the validation of the Pajeú river basin. In the model calibration of the Capibaribe river basin, the Nash-Sutcliffe ranged from 0.58 to 0.88 and the validation from 0.09 to 0.90. Then, the model was run for the period from 1961 to 1990 (baseline period) and for the period from 2041 to 2070 considering climatological data from future scenarios. The results showed that the parameterization of the model can influence the increase or reduction of the flow volumes and hydrological processes in relation to the *LULC* scenarios. There was a significant decrease in the peak flow ( $Q_{10}$ ) in the *MGB-Eta-MIROC* simulation for both basins. The *MGB-Eta-BESM* simulates a considerable increase in  $Q_{10}$  for both river basins, but with similar volumes. The *MGB-Eta-CANESM* simulates a decrease in the peak flow for the two hydrographic basins, but with greater magnitude for Capibaribe. The *MGB-Eta-HADGEM* predicts an increase in  $Q_{10}$  and a significant decrease in  $Q_{90}$  for the Pajeú river and a decrease in  $Q_{10}$  and  $Q_{90}$  for the Capibaribe river. In relation to  $Q_{90}$ , the *MGB-Eta-HADGEM* simulated the highest flow volumes for the Pajeú. Finally, although the forecasts are divergent, in any future climate scenario the impact of climate change could affect human activities and the environment.

**Keywords:** *LULC* scenarios; climate change impacts; semiarid

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma da pesquisa.....	43
Figura 2. Mapa de localização da bacia hidrográfica e de estações pluviométricas e fluviométricas do Rio Pajeú - PE.....	46
Figura 3. Mapa de localização da bacia hidrográfica e estações pluviométricas e fluviométricas do Rio Capibaribe - PE.....	48
Figura 4. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Pajeú no ano de 1985.....	58
Figura 5. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Pajeú no ano de 1985 reclassificado.....	59
Figura 6. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe no ano de 1985.....	60
Figura 7. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe no ano de 1985 reclassificado.....	61
Figura 8. Hidrograma para a estação fluviométrica de Flores – PE no período de calibração 1973 a 1982 (a) e no período de validação (b) - 1983 a 1990.....	67
Figura 9. Hidrograma de vazão para a estação fluviométrica de Floresta – PE no período de calibração 1973 a 1982 (a) e no período de validação - 1983 a 199 (b). ....	68
Figura 10. Hidrograma de vazão para a estação fluviométrica de Serra talhada – PE no período de calibração 1973 a 1982 (a) e no período de validação - 1983 a 1990 (b) .....	69
Figura 11. Cenários atuais e futuros de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	69
Figura 12. Uso e ocupação da terra nos cenários atuais de futuros.....	70
Figura 13. Validação do LCM com uso dos mapas referentes aos anos de 1985, 2000 e 2017.....	71
Figura 14. Vazão média de longo prazo nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da bacia referente aos cenários de uso e ocupação da terra e clima atual.....	72
Figura 15. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia (a); evaporação real média a longo prazo (b); umidade média do solo de longo prazo (c) referente aos cenários de uso e ocupação do solo e clima atual (1973-1982).....	73
Figura 16. Precipitação média de longo prazo nos cenários climáticos futuros e baseline (a) e diferença percentual entre futuro e baseline (b).....	74

Figura 17. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia referente ao cenário de uso e ocupação da terra e cenários climáticos MGB-Eta-BESM (a) e MGB-Eta-HADGEM (b).....	75
Figura 18. Vazão calculada com dados dos modelos climáticas no período baseline e dados observados (1961-1990) (a); Precipitação dos cenários climáticos no período baseline e observado (b); Temperatura dos cenários climáticos no período baseline e observado (c); Saldo de radiação dos cenários climáticos no período baseline e observado (d) .....	78
Figura 19. Hidrograma na estação fluviométrica de Paudalho – PE no período de calibração - 1983 a 1990 (a) e no período de validação -1973 a 1982 (b) .....	79
Figura 20: Hidrograma para a estação fluviométrica de Toritama – PE no período de calibração 1983 a 1990 (a) e validação - 1973 a 1982 (b) .....	80
Figura 21. Cenários atuais e futuros LULC para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	81
Figura 22. Uso e ocupação da terra nos cenários atuais de futuros.....	82
Figura 23. Validação do LCM em relação a cenários de uso e ocupação da terra nos cenários atuais de futuros.....	83
Figura 24. Vazão média de longo prazo nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da bacia hidrográfica do rio Capibaribe referente aos cenários LULC e cenário climático atual.....	85
Figura 25. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia (a); Evaporação real média a longo prazo (b); Umidade média do solo de longo prazo (c) referente aos cenários LULC e clima observado (1973-1982) .....	86
Figura 26. Precipitação média de longo prazo nos cenários climáticos futuros e baseline.....	86
Figura 27. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia referente ao cenário de uso e ocupação da terra e cenários climáticos MGB-Eta-BESM (a), MGB-Eta-HADGEM (b), MGB-Eta-MIROC (c) MGB-Eta-CANESM (d).....	87
Figura 28: Vazão calculada com dados dos modelos climáticas no período baseline e dados observados (1961-1990) (a); Precipitação dos cenários climáticos no período baseline e observado (b); Temperatura dos cenários climáticos no período baseline e observado (c); Saldo de radiação dos cenários climáticos no período baseline e observado (d).....	91

## LISTA DE QUADRO E TABELA

Quadro 1. Caracterização dos cenários RCPs.....	36
Quadro 2. Informações sobre BESM e CANESM.....	64
Quadro 3. Informações sobre HadGEM2-ES e MIROC5.....	65
Tabela 1. Tipos de solos existentes na bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	57
Tabela 2. Tipos de solos existentes na bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	57
Tabela 3. Estatística do modelo para o período de calibração e validação na bacia hidrográfica do rio Pajeú – PE.....	67
Tabela 4. Vazões máximas, mínimas e média nos cenários de uso e ocupação da terra e climáticos.....	76
Tabela 5. Vazões Q10 e Q90 a nível mensal nos cenários de uso e ocupação da terra e climáticos.....	77
Tabela 6. Estatística do modelo para o período de calibração e validação para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe – PE.....	80
Tabela 7. Vazões máximas, mínimas e média nos cenários LULC e climáticos.....	89
Tabela 8. Vazões Q <sub>10</sub> e Q <sub>90</sub> a nível mensal nos cenários LULC e climáticos.....	90

## LISTA DE EQUAÇÃO

Equação 1. Balanço hídrico na camada superficial do solo.....	51
Equação 2 e 3. Função de Brooks e Corey para a condutividade hidráulica .....	52
Equação 4. Cálculo de escoamento subterrâneo.....	52
Equação 5. Cálculo de escoamento subterrâneo.....	53
Equação 6: Equação para o cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) das vazões.....	54
Equação 7. Equação para o cálculo do coeficiente para o logaritmo das vazões (NSlog).....	55
Equação 8. Equação para o cálculo do erro de volume (EV).....	55
Equação 9. Índice Kappa (k) desenvolvida por Cohen (1960) .....	63

**LISTA DE SIGLAS**

ANA - Agência Nacional das Águas

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas

BESM - Brazilian Earth System Model

CanESM2 - Canadian Earth System Model versão 2

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EV - Erro de volume

GCM - Modelo de circulação global

HadGEM2-ES - Hadley Center Global Environment Model versão 2

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC - International Plant Protection Convention

LCM - Land Change Modeler

LULC - Land Use and Land Cover

MGB - Modelo para Grandes Bacias

MCGs - Modelos de Circulação Geral

MIROC5 - Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5

NSlog - Coeficiente para o logaritmo das vazões

NS - Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Qcal - Vazão Calculada

Qobs - Vazão observada

SIG - Sistema de informação geográfico

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SWAT - Soil and Water Assessment Too

URH - Unidade de Resposta Hidrológica

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

b - Parâmetro de capacidade de infiltração de água no solo

Cb - Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo

Cs - Parâmetro para calibração da propagação superficial nas células

CI - Parâmetro para calibração da propagação sub-superficial nas células

Kbas - Parâmetro de escoamento subterrâneo

Kint - Parâmetro de drenagem sub-superficial

Q<sub>10</sub> - Vazão de cheia

Q<sub>90</sub> - Vazão de estiagem

Wc - Limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou descendente

Wm - Parâmetro de capacidade de armazenamento de água no solo

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	20
2.1	OBJETIVO GERAL .....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
3	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	21
5	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
5.1	PROCESSOS HIDROLÓGICOS INFLUENCIADOS POR ALTERAÇÕES DO AMBIENTE .....	22
5.2	CENÁRIOS <i>LAND USE AND LAND COVER</i> (LULC) .....	25
5.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS LULC E PARAMETRIZAÇÃO DOS MODELOS. ....	28
5.4	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MODELOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL (MCGS) .....	32
5.5	CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	35
5.6	MODELAGEM HIDROLÓGICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	37
6	<b>METODOLOGIA</b> .....	43
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	44
6.1.1	Estado de Pernambuco .....	44
6.1.2	Bacia hidrográfica do rio Pajeú – PE .....	45
6.1.3	Bacia hidrográfica do rio Capibaribe-PE .....	48
6.2	O MODELO MGB-IPH .....	50
6.2.1	Definição dos parâmetros fixos e calibráveis .....	53
6.2.2	Período de calibração e validação .....	53
6.2.3	Estatísticas do modelo MGB-IPH .....	54
6.2.4	Dados de entrada do modelo para o modelo <i>MGB-IPH</i> .....	55
6.2.5	Definição das unidades de respostas hidrológicas (URH) .....	56

6.3	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS FUTUROS <i>LULC</i> .....	61
6.4	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS FUTUROS DE CLIMA.....	63
6	<b>RESULTADOS</b> .....	67
6.1	RESULTADOS DA MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PAJEÚ.....	67
6.1.1	Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pajeú – calibração e validação .....	67
6.1.2	Cenários do LCM para bacia hidrográfica do rio Pajeú.....	69
6.1.3	Simulação hidrológica dos cenários <i>LULC</i> .....	71
6.1.4	Modelagem hidrológica dos cenários futuros de clima e <i>LULC</i> comparados ao período baseline .....	74
6.2.	RESULTADOS DA MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE.....	79
6.2.1	Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Capibaribe/PE - calibração e validação .....	79
6.2.2	Cenários do <i>LCM</i> para bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	81
6.2.3	Simulação hidrológica dos cenários <i>LULC</i> .....	84
6.2.4	Modelagem hidrológica dos cenários futuros de clima e ocupação da terra comparados ao período baseline .....	86
7	<b>DISCUSSÃO</b> .....	93
7.1	AJUSTE DO MODELO MGB-IPH.....	93
7.2	MODELAGEM HIDROLÓGICA DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO .....	94
7.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS FUTUROS DE CLIMA E <i>LULC</i> .....	99
7.4	NO QUE OS RESULTADOS DA MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS FUTUROS DE CLIMA E <i>LULC</i> PODEM AUXILIAR NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS? .....	101
8	<b>CONCLUSÃO</b> .....	105

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>108</b>
ANEXO I – PARÂMETROS FIXOS DO MODELO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PAJEÚ .....	131

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de estudos, visando encontrar variações de características da paisagem para confirmar ou constatar a ocorrência das mudanças climáticas é um passo crucial para definir, caracterizar e quantificar as adversidades desse fenômeno sobre o meio ambiente. Tais estudos permitem avaliar a vulnerabilidade do meio ambiente em relação às alterações do clima e, ainda, o seu efeito sobre as atividades humanas, além de ajudar a entender a dinâmica da tal problemática.

Embora a variabilidade seja uma componente conhecida na dinâmica climática, seu impacto, mesmo dentro de limites esperados, pode ter reflexos significativos nas mais diversas atividades humanas (NUNES E LOMBARDO, 1995), como na disponibilidade de água para a indústria alimentícia e para a de agricultura (FRONE E FRONE, 2015), para a produção de energia e para a indústria do gás, bem como na segurança hídrica relacionada ao abastecimento de água para a população, entre outros.

Pesquisas têm mostrado que, além dos gases do efeito estufa, alterações do uso e da ocupação da terra e o desmatamento das florestas podem ocasionar mudanças climáticas e, conseqüentemente, reações adversas para o desenvolvimento das atividades humanas (SANTOS E SANTOS, 2013; FREIRE E CASTRO, 2013).

O desmatamento das florestas causa alterações na precipitação e, conseqüentemente, ocorre maiores flutuações da temperatura, havendo um menor valor de evapotranspiração, bem como um menor teor de umidade do solo em camadas profundas (TUCCI, 2005). Alterações no uso, na ocupação da terra e na cobertura vegetal ocasionam o aumento da temperatura, criando ilhas de calor (MASULLO; RANGEL, 2012). A retirada da vegetação para a pavimentação dificulta a infiltração de água no solo, o que pode interferir no abastecimento das águas subterrâneas.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) projeta condições mais secas em 70% da região latino-americana, aumentando o número de países com condições de estresse hídrico. Além disso, a região apresenta um acentuado efeito do El Niño - Oscilação Sul (ENOS) no seu regime climático. Uma vez que a dinâmica do ENOS pode ser usada para explicar a variabilidade hidroclimática interanual, as previsões de sua ocorrência e sua gravidade são informações essenciais para o desenvolvimento de estratégias de gestão adaptativa (MEZA *et al.*, 2003).

Nesse sentido, os estudos de modelagem hidrológicas alimentados por cenários climáticos oriundos dos modelos globais de circulação (GMCs) têm mostrado que diversas bacias hidrológicas funcionam como fonte adicional de pressão na demanda de água para irrigação por meio da elevação nos níveis de evapotranspiração de referência como consequência da elevação de temperatura, agravado, ainda, pela redução na precipitação (ARROIO JUNIOR; MAUAD 2015; GODIN *et al.*, 2011).

Os cenários futuros de clima desenvolvidos pelo IPCC servem como dado de entrada para modelos climáticos terrestres e apresentam melhores resultados para escalas continentais; já os cenários futuros de clima resultantes das simulações dos modelos climáticos terrestres são utilizados para alimentar modelos climáticos regionais, que preveem alterações nos regimes de precipitação pluviométricas a depender do cenário climático utilizado (SANTOS, 2019; FERREIRA 2017), a elevação da temperatura em determinadas regiões observada e o resultado da modelagem hidrológica podem acarretar na alteração do escoamento superficial, nos valores de evapotranspiração e na umidade (VERGASTA *et al.*, 2021; SANTOS, 2019).

Os cenários futuros de mudanças climáticas apontam para situações severas para diversas bacias hidrográficas localizadas no território brasileiro (VERGASTA *et al.*, 2021; SANTOS, 2019; FERNANDES, 2017; ARROIO JUNIOR; MAUAD 2015; GODIN *et al.*, 2011). Por esse motivo, é de suma importância continuar desenvolvendo pesquisas a fim de analisar os possíveis impactos impostos por cenários posteriores de clima em bacias hidrográficas.

Além disso, a soma de diversos fatores, tais como o crescimento populacional, a mudança no estilo de vida, a deterioração ambiental e as alterações climáticas podem reduzir o acesso à qualidade e à quantidade de água potável, bem como provocar o aumento da variabilidade e da magnitude dos eventos climáticos.

Nesse sentido, com cada vez menos acesso à água doce, devido a eutrofização dos rios, e os riscos cada vez maiores em eventos extremos, será cada vez mais difícil alcançar a segurança hídrica e sustentá-la (SISKA; TARAHA, 2014).

Desse modo, essas alterações impostas ao meio ambiente produzem efeitos biofísicos reais que podem desestabilizar a segurança hídrica, produzindo grandes impactos sob a manutenção da vida humana e serviços necessários para sustentar a vida no ecossistema.

Aliado a isso, existe um sistema dinâmico e vivo que responde a cada atividade desenvolvida pelo homem. Diante de tal problemática, torna-se necessário desenvolver pesquisas que possam levantar dados e avaliar o efeito das mudanças globais e climáticas sobre

a segurança hídrica, com o intuito de dar subsídios para a gestão e desenvolvimento de políticas e instrumentos de controle de disponibilidade de água e adaptações a seca.

Além disso, é importante analisar os impactos dos cenários climáticos desenvolvidos pelos modelos de circulação global (MCG), modelos de sistema terrestres e modelos climáticos regionais para compreender quais são os possíveis impactos desses cenários sob os processos hidrológicos e, até mesmo, verificar se as previsões climáticas realizadas por esses modelos são realmente plausíveis.

Entretanto, os modelos hidrológicos utilizados também podem apresentar resultados divergentes entre as aplicações. É o caso do modelo hidrológico distribuído *MGB-IPH*, que vem apresentando resultados divergentes em relação à simulação de cenários *LULC* (do Inglês land use and land cover) (SIRQUEIRA *et al.*, 2022; BRITO NETO *et al.*, 2021; COCCONI, 2019; BAYER; COLLISCHONN, 2013). Muitos autores sugerem que essas divergências de resultados ocorrem em função das características intrínsecas de cada bacia hidrográfica, porém a buscar por melhores entendimentos sobre tal problemática, encontra-se essa justificativa. Por esse motivo, se motiva a escolha do modelo hidrológico *MGB-IPH*, com o objetivo de entender melhor porque os resultados são divergentes em relação as simulações de cenários *LULC*.

Desse modo, o objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência de cenários futuros de clima e uso e cobertura da terra – *LULC* na bacia hidrográfica do rio Pajeú-PE e na bacia hidrográfica do rio Capibaribe- PE em relação a vazão.

A escolha por essas duas bacias se deve ao fato desta tese ter sido desenvolvida no âmbito do projeto de pesquisa “Innovative Science and Influential Policy Dialogues for Water Security in the Arid Americas” em que equipes de cinco países das Américas desenvolveram atividades de pesquisa em bacias pareadas. O intuito era selecionar bacias com diferentes estágios de evolução em termos de ocupação de modo que uma pudesse ser utilizada como referência para outra. Para a equipe da UFPE, foram definidas as bacias dos rios Capibaribe – como referência ao estágio mais avançado de ocupação - e Pajeú - como referência ao estágio anterior de ocupação.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar a influência de cenários futuros de clima, de uso e da cobertura da terra - *LULC* (do Inglês land use and land cover) na bacia hidrográfica do rio Pajeú-PE e na bacia hidrográfica do rio Capibaribe- PE em relação à vazão.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a evolução do uso da terra e sua influência sobre a vazão e sobre os processos hidrológicos nas bacias hidrográficas em estudo;
- Analisar se os cenários futuros de clima e *LULC* apresentam variações positivas ou negativas nas vazões mínimas, médias e máximas nos cenários de clima presente e futuros nas áreas de estudo;
- Avaliar desempenho do modelo hidrológico *MGB* em representar alterações de cenários *LULC* e de mudanças climáticas;
- Avaliar desempenho do software *Land Change Modelar (LCM)* em representar previsões de cenários *LULC*;

### 3. JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa parte do pressuposto de que os processos globais dinâmicos, como a mudança climática, o uso da terra, a urbanização, o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico produzem efeitos biofísicos adversos que podem desestabilizar a segurança hídrica e produzir impactos socioambientais alarmantes.

Nesse sentido, faz-se necessário desenvolver estudos com o intuito de identificar ou avaliar o tamanho do impacto causado por tais processos em relação às atividades desenvolvidas pelo ser humano, tornando-as sustentáveis.

Além disso, os resultados provindos de estudos que realizam modelagem hidrológica, mesmo sendo cenários, servem para orientar a tomada de decisão nos processos de gestão de risco, assim como para nortear a tomada de decisão dos gestores que atuam no controle e na contenção de enchentes e, também, para adotar técnicas em prol da segurança hídrica nos períodos de estiagem.

Ao mesmo tempo, o modelo hidrológico adotado nesta pesquisa vem apresentando resultados divergentes em relação a simulações de cenários de alterações de uso e de ocupação da terra. Os estudos realizados com a utilização de *MGB-IPH* relatam que os resultados divergentes ocorrem devido às características intrínsecas das bacias hidrográficas. Porém, a presente pesquisa procura entender melhor o porquê de resultados tão divergentes.

## 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1. PROCESSOS HIDROLÓGICOS INFLUENCIADOS POR ALTERAÇÕES DO AMBIENTE

A vegetação é um componente de grande importância para o balanço de energia e para o fluxo de volumes de água de uma bacia hidrográfica, influenciando os processos hidrológicos, tais como: evapotranspiração, escoamento, infiltração e umidade do ar. Além desses processos, alguns estudos apontam que existe relação entre o processo de formação da precipitação pluviométrica com a vegetação (GONÇALVES; BACK, 2018; MACIEL, 2017; FEARNSSIDE, 2015; CAMPOS; HIGUCHI, 2009).

A relação precipitação pluviométrica com vegetação tem início a partir do momento em que a parcela inicial da primeira é retida pela segunda através do processo denominado interceptação. Nesse sentido, quanto maior for a superfície da folhagem da vegetação, maior será a área de retenção da água durante o processo de precipitação. O volume retido por aquela é evaporado à medida que houver capacidade potencial de evaporação (REICHARDT; TIMM, 2016; BEZERRA, 2013; TUCCI; CLARKE, 1997).

Dessa forma, quando o volume retido pela vegetação é totalmente evaporado, esta perde umidade para o ambiente através da transpiração, sendo captada por ela a umidade do solo através de suas raízes, que devolve a umidade para o ar e, conseqüentemente, favorece a formação de nuvens e a condensação da chuva (REICHARDT; TIMM, 2016; TUCCI, 2005; TUCCI; CLARKE, 1997).

Além disso, a interceptação da chuva pela vegetação é um fator de grande importância, proporcionando a proteção do solo à medida que reduz a erosão provocada pelo seu potencial impacto na camada mais superficial do solo (GERRITS; SAVENIJE, 2011; HÖRMANN *et al.*, 1996). Desse modo, a interceptação da vegetação pode ser considerada como um processo hidrológico que apresenta potencial para influenciar outros processos de mesma ordem como: infiltração, umidade do ar e do solo, os vários tipos de escoamento, a vazão e erosão do solo (KEIM *et al.*, 2005; TSIKO *et al.*, 2005).

A formação florestal também apresenta influência sobre o processo de infiltração e escoamento da água no solo. Aquele consiste no processo pelo qual a água penetra o solo e perdura enquanto houver disponibilidade de água na superfície (REICHARDT; TIMM, 2016). É um processo de grande valor uma vez que sua velocidade determina o deflúvio superficial, que é responsável pelo processo de erosão durante o processo de precipitação. Além disso,

ainda é responsável pelo balanço de água na zona das raízes da vegetação que coloniza o solo, o que aumenta a importância de bem conhecê-lo, assim como sua relação com o processo de infiltração e com as propriedades do solo.

Nesse sentido, a vegetação densa com formação de dossel apresenta uma capacidade de infiltração mais elevada (MARTINS *et al.*, 2017). Isso ocorre em função da presença de uma vegetação bem desenvolvida e de grande porte, que, por possuir raízes profundas e caules robustos, dificulta o processo de percolação de água no solo e favorece o acúmulo de água da chuva e, conseqüentemente, proporciona um maior volume infiltrado.

O escoamento superficial, por sua vez, ocorre quando a água da chuva escoar sobre a superfície do solo da bacia hidrográfica até encontrar a calha do rio, sendo o resultado da precipitação pluviométrica que não foi interceptada pela vegetação, salientando-se, no entanto, que existem escoamentos superficiais contínuos e não contínuos.

Esse processo hidrológico sofre influência da cobertura vegetal nas bacias hidrográficas rurais e nas urbanas, onde é regido pela interferência das superfícies impermeáveis construídas pela atividade humana (TUCCI, 2005).

Desse modo, a conduta do escoamento superficial está fortemente relacionada à cobertura vegetal, à declividade do terreno, à rede de drenagem da bacia hidrográfica e às propriedades físicas do tipo do solo.

Nesse sentido, estudos relatam que a altura da vegetação também pode influenciar o processo de infiltração e de escoamento (LORENZO, 2011). A redução do escoamento superficial e da produção de sedimentos ocorre em cenários com mata nativa (LINO, 2009). Ainda nessa direção, de acordo com Blainski *et al.* (2011), a vazão média diária anual é maior no cenário com solo exposto em função da redução da infiltração de água no solo e do aumento do escoamento superficial.

O que se observa é que quanto mais o solo estiver com sua área superficial desprotegida, sofrendo a ação da compactação, menor será a capacidade de infiltração, e, conseqüentemente, maior será o escoamento superficial (TUCCI; CLARKE, 1997).

Quanto maior for a área de interceptação da vegetação, maiores serão os teores de umidade do ar, podendo variar de espécie para espécie de plantas, assim como, de acordo com a função ecológica do tipo de bioma. No entanto, a umidade do solo, como esperado, é inversamente proporcional à interceptação (GÊNOVA *et al.*, 2007). Mostrando que, no primeiro instante, o solo apresentará maiores teores de umidade quando desprotegidos, porém,

em longo prazo, devido à radiação solar, essa umidade não se manterá por muito tempo sem a presença da vegetação.

A umidade e capacidade de infiltração possuem relação com a presença da matéria orgânica no solo. Desse modo, as áreas antropizadas, por apresentarem pouca presença de matéria orgânica (serapilheira e a própria vegetação viva), possuem baixos teores de umidade no solo e menor capacidade de infiltração (MENDONÇA *et al.*, 2009).

Desse modo, em solos expostos, sem cobertura vegetal, o teor de umidade geralmente é baixo ao tempo que ocorre a elevação da temperatura. Esse fato ocorre em função da incidência solar, que atinge e permanece por maior tempo em contato com a terra, diversamente de superfícies ou áreas ocupadas por densa cobertura vegetal.

Além disso, sabe-se que a presença da vegetação também apresenta forte influência em relação à disponibilidade da água, favorecendo-a as áreas ocupadas por matas e pastagens, bem como a qualidade nas bacias hidrográficas (VANZELA *et al.*, 2009). Já as regiões habitadas, agricultadas e matas degradadas reduzem a disponibilidade e a qualidade da água (REICHARDT; TIMM, 2016; VANZELA *et al.*, 2009; TEIXARA *et al.*, 2007; TUCCI, 2005).

Isso é facilmente observável ao comparar bacias hidrográficas com a presença de vegetação nativa em suas margens, que sempre apresentam fluxo corrente e volumoso em sua calha do rio, contrastando com as que não a possuem, a exemplo da bacia hidrográfica do rio Miriri, localizada no litoral norte paraibano, que se apresenta bastante desmatada, sendo ocupadas pela monocultura, possuindo pouco fluxo de água, estando fortemente assoreada e com extensas áreas ocupadas (cana-de-açúcar).

Esses são os fatores que interferem a funcionalidade dos processos hidrológicos e que apresentam interferência na vazão do rio de uma bacia hidrográfica. Nesse sentido, Tucci (2005) ressalta que o efeito do desmatamento em relação ao escoamento deve ser separado de acordo com o efeito sobre a vazão média, mínima e máxima, respectivamente. No que tange ao efeito do segundo fenômeno mencionado neste parágrafo sobre o primeiro, o mesmo autor relata:

- A redução da cobertura de floresta aumenta a vazão média. A retirada natural daquela resulta em seu considerável aumento inicial, função da precipitação;
- O estabelecimento de cobertura vegetal em áreas de vegetação esparsa diminui a vazão média;

- A vazão média, após o crescimento da vegetação, pode ficar acima das condições de pré-desmatamento no caso de culturais anuais, formando um cerrado rasteiro.

O avanço dos assentamentos urbanos está atrelado à modificação da cobertura vegetal natural, o que provoca, inevitavelmente, diversos efeitos, podendo resultar na alteração dos componentes do ciclo hidrológico, como diminuição da infiltração; a elevação dos volumes do escoamento superficial; a redução do nível do lençol freático; a redução da evapotranspiração (ET), já que a superfície urbana não retém água (MELO *et al.*, 2021; LATUF, 2011; TUCCI, 2005)

Em relação a ET, os valores mais elevados são, geralmente, observados em áreas com presença de corpos hídricos, como em culturas agrícolas, e ao longo de matas ciliares, devido ao processo de irrigação. Ao tempo que seus menores valores são observados em áreas secas e, também, em zonas com pouca cobertura vegetal (BEZERRA, 2013; FUJACO; LEITE, 2013; SCHIRMBECK, 2005).

Portanto, a remoção da vegetação natural ou alteração do ambiente pode ocasionar modificações em todos os processos hidrológicos. Nesse sentido, o ciclo deste se altera, podendo ocorrer elevação do albedo (TUCCI, 2005); flutuações da temperatura e alterações negativas na evapotranspiração (CARODOSO; JUSTINO, 2014) e menor variabilidade da umidade do solo (FUJACO; LEITE, 2013).

Nesse contexto, a alteração do ambiente pode acarretar impactos multivariados para bacias hidrográficas. Essa é uma temática que vem sendo estudada exaustivamente ao longo dos anos, porém os estudos apresentam resultados, muitas vezes, divergentes em relação à modelagem de cenários de uso e de ocupação da terra, como será visto mais adiante. A seguir, serão abordadas técnicas utilizadas para o desenvolvimento de mapas e de cenários de uso e ocupação da terra e de cobertura vegetal.

## 5.2. CENÁRIOS *LAND USE AND LAND COVER* (LULC)

Os impactos ocasionados pelo uso e ocupação da terra e mudança da cobertura vegetal podem ser multivariados, alterando o funcionamento dos componentes hidrológicos e, conseqüentemente, impactando as bacias hidrográficas. Nos últimos anos, diversos estudos foram desenvolvidos a fim de verificar como diferentes tipos de cenários de uso e de ocupação da terra poderiam alterar os volumes de vazão e os componentes hidrológicos.

No entanto, inicialmente, os métodos utilizados para o desenvolvimento dos cenários de uso e de ocupação da terra eram mais simples. Pesquisadores costumavam utilizar softwares de sistema de informação geográfico (SIG) para reclassificar mapas de uso e de ocupação da terra de modo que determinada área ocupada por um tipo de vegetação deste mapa fosse transformada em outro tipo de vegetação (BAYER; COLLISCHONN, 2013). O resultado dessa reclassificação se constituía em uma unidade de resposta hidrológica (URH) para a utilização de modelos hidrológicos.

O método de reclassificação de mapas de uso e de ocupação da terra é uma técnica mais simples, mas que possibilita entender como o modelo hidrológico poderia responder frente a alterações dos atos já mencionados na primeira linha deste parágrafo e da cobertura vegetal. Porém, em se tratando da fidelidade da representação da superfície da bacia hidrográfica, essa técnica deixa muito a desejar pelo fato de apenas reclassificar um tipo de vegetação em outra, ou um tipo de vegetação em área urbana, sem respeitar o padrão do desenvolvimento espaço temporal do uso e de ocupação da terra e da cobertura vegetal.

Os mapas de uso e ocupação da terra e de cobertura vegetal são frequentemente desenvolvidos com a utilização de softwares de SIG por meio de algoritmo para a classificação supervisionada e não supervisionada de imagens de satélites. Mais detalhes sobre esses métodos podem ser encontrados em Albuquerque (2019), Rodrigues *et al.* (2015) e Mello *et al.* (2012). Também é possível desenvolver os mapas de uso e ocupação da terra com aplicação de índices de vegetação como *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* e *SAVI (Soiladjusted Vegetation Index)*.

Porém, esses métodos apresentam limitações em relação à qualidade das imagens de satélites que podem apresentar nuvens, dependendo da região. Além disso, são índices que funcionam melhor com imagens de satélites feitas no período chuvoso por ser dependente do índice espectral da vegetação. Desse modo, não sendo um ótimo método para regiões áridas devido à queda das folhas da vegetação no período de estiagem. Mais detalhes sobre a utilização do *NDVI* e *SAVI* podem ser encontrados em Leite *et al.* (2017), Queiroz Júnior *et al.* (2013) e Lobato *et al.* (2010).

Atualmente é possível encontrar produtos prontos com considerável qualidade, ou seja, sem que seja necessário realizar algumas das técnicas supramencionadas para obtenção de mapas de uso e ocupação da terra e de cobertura vegetal, como é o caso do projeto MapBiomass (SOUZA *et al.*, 2020), o qual vem realizando a classificação de imagens de satélite Landsat desde o ano de 1985 até os dias atuais.

Porém, uma limitação que essa iniciativa apresenta é que generaliza alguns tipos de vegetação, como é o caso da caatinga, que é chamado de savana. Nesse caso, é necessário conhecer a região de estudo para que seja possível utilizar as informações dos mapas de uso e ocupação da terra e de cobertura vegetal.

Em relação ao desenvolvimento de cenários futuros *LULC*, é possível analisar o padrão da evolução espaço temporal do uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal, analisando como esse processo vem ocorrendo ao longo dos anos com a utilização de softwares de SIG. Assim como é possível criar panoramas futuros *LULC* projetando-os com informações baseadas no processo de transição de uma classe para outra. Para tanto, é possível utilizar a ferramenta “buffer” do software de SIG, além de ser necessário empregar diversas outras ferramentas para chegar a um produto final.

Porém, a realização desse procedimento requer um conhecimento mais avançado em SIG, além de demandar tempo demais para analisar como ocorre o padrão espaço temporal do uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal e para se desenvolverem cenários futuros, o que pode impossibilitar ou dificultar a ampliação desse modelo de pesquisa.

Porém, nos dias de hoje, existem softwares que realizam a geração de cenários futuros de uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal, facilitando o desenvolvimento de pesquisas que procuram avaliar alterações impostas por essa variável sobre os componentes hidrológicos.

A exemplo do *LuccME*, que é um software que foi desenvolvido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE) e por colaboradores, como uma extensão do ambiente de modelagem TerraME. Alguns trabalhos desenvolvidos com a utilização desse software podem ser vistos em Tejada *et al.* (2016) e Aguiar *et al.* (2012).

Outro exemplo de sistema que pode ser utilizado para previsão de cenários *LULC* é o *Land Change Modeler (LCM)* que é integrado ao software de SIG *IDRISI*, o qual realiza projeções de cenários futuros de uso e ocupação da terra baseado em mapas atuais e passados. O LCM vem sendo muito utilizado atualmente e mais detalhes sobre suas características podem ser encontrados em Folharini; Oliveira (2020), Estoque *et al.* (2019), Xavier e Silva (2018), Eastman (2016) e Olmedo *et al.* (2013).

Existem diversos métodos utilizados para analisar a evolução do uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal. Porém, as alterações ocasionadas pela alteração dessa última podem ocasionar impactos multivariados em relação aos componentes do ciclo hidrológico. Nesse sentido, diversos estudos procuram investigar qual seria sua magnitude, assim como, de que forma poderiam ocorrer esses impactos em relação a bacias hidrográficas.

Nesse contexto, diversos são os estudos de modelagem hidrológica que buscam identificar como a alteração do uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal poderia influenciar os processos hidrológicos, o que será visto a seguir.

### 5.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS LULC E PARAMETRIZAÇÃO DOS MODELOS.

A modelagem hidrológica proporciona a realização de simulações dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica e sua avaliação quanto ao seu desenvolvimento. Ainda por meio dela, é possível analisar como alterações do ambiente podem impactar o ciclo hidrológico.

Em relação à realização da modelagem hidrológica com objetivo de verificar como as alterações do uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal podem influenciar os processos hidrológicos, diversos estudos vem sendo desenvolvidos e apresentando resultados bastante divergentes, seja em relação às características intrínsecas de cada região, devido à influência do modelo hidrológico utilizado ou à parametrização deste último.

Um exemplo desse tipo de estudo foi o desenvolvido por Masullo e Rangel (2012) ao verificarem que a alteração do uso e ocupação da terra ocasiona o aumento da temperatura, criando ilhas de calor. Os autores observaram, ainda, que a retirada da vegetação para a pavimentação dificulta o processo de infiltração de água no solo, o que pode interferir no abastecimento das águas subterrâneas.

O conhecimento das dinâmicas de transformação do uso e cobertura da terra tem se mostrado cada vez mais importante para compreensão do espaço geográfico, possibilitando analisar tendências de cenários futuros.

No entanto, os estudos são diferentes em termos de metodologia escolhida para definição dos cenários de uso e ocupação da terra. Muitas vezes apresentam resultados divergentes. Por tal motivo, cada pesquisa aqui apresentada será detalhada para que seja possível comparar uma pesquisa com a outra. Isso irá facilitar as análises dos resultados e a compressão da temática em questão.

Nesse sentido, Bayer e Collischonn (2013) desenvolveram um estudo na bacia do rio das Almas, localizada no Estado de Goiás com a utilização do modelo MGB-IPH. Os autores constataram um aumento na vazão de longo prazo nos cenários com 100% de cobertura vegetal do tipo pastagem em comparação com cenários de uso da terra com cobertura vegetal do tipo floresta.

Beserra (2016) realizou a modelagem hidrológica - *MGB-IPH* - da bacia do rio Grande, afluente do rio São Francisco. Uma informação importante sobre essa pesquisa diz respeito à questão da parametrização do modelo, considerando o autor suas incertezas com relação aos parâmetros. Nesse sentido, não foi considerada apenas a existência de um único conjunto de parâmetro, mas sim de diversos deles que podem representar a bacia.

Nesse sentido, o modelo foi calibrado de forma automática e foram considerados os 30 melhores resultados conforme a função objetiva *NSElog*, por representar melhor a vazão de baixa. O resultado da pesquisa apontou que, em todas as comparações, ocorreu sua redução em função da substituição da vegetação natural por pastagem e culturas agrícolas.

Esse resultado foi divergente do encontrado por Bayer e Collischonn (2013) para a bacia hidrográfica do rio das Almas (Goiás) e do que relata a literatura sobre o tema em questão. O que se percebe é que em relação à modelagem hidrológica de cenários de uso e ocupação da terra do modelo *MGB-IPH*, os resultados das pesquisas são bastante divergentes.

Por exemplo, Sirqueira *et al.* (2022) realizaram a modelagem hidrológica de diferentes cenários de uso da terra na Bacia do Rio Sapucaí (MG) com a utilização desse último modelo hidrológico citado. Os cenários de uso e ocupação da terra desenvolvidos levaram em consideração o que relata o código florestal sobre área de proteção permanente (APP). Nessa pesquisa, foi considerado o que definia o código anterior e atual para desenvolver os cenários. Quatro foram os panoramas de uso e ocupação da terra desenvolvidos:

Cenário C1: Maior degradação da cobertura florestal na bacia e nas APPs de topo de morro;

Cenário C2: Panorama otimista em termos de conservação da cobertura florestal nas APPs de topo de morro;

Cenário C3: Representa o cumprimento legal da Resolução CONAMA 303/2002;

Cenário C4: consiste em considerar a cobertura florestal na área total da sub-bacia, exceto nas áreas identificadas pelas classes água e urbana.

Segundo os autores supracitados, não há diferenças no comportamento hidrológico da bacia em estudo em relação às condições atuais e nos cenários C1, C2, C3. No entanto, nos C3 e C4 foi verificada uma elevação das vazões médias que, segundo os autores, teve coincidência com aumento da área ocupada pela cobertura florestal. Os pesquisadores ainda relataram que essa elevação ocorreu em função da maior quantidade de água no solo, tendo em vista que o escoamento superficial foi reduzido com o aumento da cobertura florestal na sub-bacia.

Algo que pode ser questionado em relação a essas duas pesquisas relatadas anteriormente é sobre a questão da parametrização do modelo. O modelo *MGB-IPH* possui parâmetros calibráveis que dizem respeito ao tipo de uso e ocupação da terra, ao da cobertura vegetal e, também, ao tipo de solo. Um desses parâmetros é o  $W_m$  que controla a capacidade de armazenamento de água no solo.

Ainda descrevendo o modelo supramencionado, o qual também gera escoamento sempre que a capacidade de armazenamento de água do solo atingir a sua capacidade máxima. Desse modo, quanto maior for o valor atribuído ao  $W_m$ , maior será a capacidade de o solo armazenar água e menor será o escoamento. Por outro lado, quanto menor for o seu valor, maior será o escoamento superficial e, conseqüentemente, maior tenderá a ser a vazão.

Nesse sentido, é de grande importância verificar o que relata a literatura sobre o comportamento dos processos hidrológicos, seja em bacias experimentais ou não, para definir os parâmetros dos modelos hidrológicos de modo que um desses possa gerar o resultado conforme o esperado, porque se for definido que a *URH* floresta apresenta menor valor de  $W_m$  e pastagem maior valor de  $W_m$ , ao ocorrer a transição de um tipo de vegetação para outro, o modelo *MGB-IPH* irá apresentar o resultado informando que essa última ocasiona a diminuição do escoamento superficial ao tempo que áreas ocupadas por formação florestal apresentará o contrário. A literatura, no entanto, apresenta-se na contramão dessa lógica.

Outro estudo nessa temática foi desenvolvido por Brito Neto *et al.* (2021) para a bacia hidrográfica do rio Pardo (MG), também com a utilização do mesmo modelo hidrológico ora apresentado. Foram utilizados dois cenários de uso e ocupação da terra e de cobertura vegetal referentes ao mapeamento de dois anos diferentes (2001 e 2016).

O cenário referente ao ano de 2016 apresentou duas áreas: uma menor que estava ocupada por vegetação florestal e uma maior, ocupada por agricultura, divergindo em uma diferença de aproximadamente 5% entre ambas. Nessa pesquisa, foram considerados os mesmos valores para o conjunto de parâmetros das unidades de resposta hidrológica. De acordo com os resultados obtidos pelos autores supracitados, o cenário referente ao ano de 2016 apresentou maiores valores de vazões mensais médias, totais, máximas e mínimas em comparação ao cenário referente ao do ano de 2001.

Na pesquisa supracitada, o conjunto de parâmetros fixos foi semelhante ao adotado por Bayer e Collischonn (2013), inclusive é algo mencionado pelos seus autores. No entanto, o estudo em questão não apresentou o conjunto de parâmetros calibráveis. Porém, a pesquisa

desenvolvida por Brito Neto *et al.* (2021) apresentou resultado esperado, ou seja, conforme o que relata a bibliografia em questão.

Cocconi (2019) também desenvolveu um estudo de modelagem hidrológica com objetivo de verificar como diferentes cenários de uso e ocupação da terra podem impactar o comportamento do regime de vazão na bacia hidrográfica Taquari-Antas. Para tanto, também foi utilizado o modelo *MGB-IPH*, em que os cenários de uso e ocupação da terra foram bases cartográficas do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE).

Os resultados mostram que houve diminuição do escoamento superficial e das vazões médias em longo prazo nos cenários de uso e ocupação da terra com maior área ocupada por vegetação natural, ao tempo em que houve elevação ainda nesse panorama com maior área ocupada por agricultura.

Os resultados obtidos por Cocconi (2019), Brito Neto *et al.* (2021) e Bayer; Collischonn (2013) são os esperados, considerando o que relata a literatura sobre o tema. Inclusive, outros modelos hidrológicos também apresentam resultados semelhantes e frequentemente utilizados para verificar a influência de diferentes cenários de uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal em bacias hidrográficas, a exemplo do modelo *SWAT*. Os resultados apresentados pelas pesquisas que adotaram esse modelo são mais semelhantes, ou seja, apresentam menores divergências entre si.

Maraslis (2022) utilizou o modelo supramencionado para avaliar a influência de cenários de uso e ocupação da terra no rio João Gualberto, sub-bacia da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. Para tanto, o autor elaborou mapas de uso e ocupação da terra para diferentes cenários, considerando os anos 2000, 2010 e 2020. Tais panoramas foram desenvolvidos com o auxílio da ferramenta Google Earth Engine e de imagens de satélite *Landsat*. Os resultados desta pesquisa mostraram que os cenários com maior área urbana e menor cobertura vegetal densa tiveram picos de vazão ( $Q_{10}$ ) mais elevados e fluxos de base ( $Q_{90}$ ) com vazões reduzidas.

Outra pesquisa utilizando o modelo *SWAT* foi desenvolvida por Perazzoli *et al.* (2013) para a bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia. Os autores desenvolveram três cenários de uso e ocupação da terra e de cobertura vegetal. Sendo que o primeiro representou a agricultura; No segundo, toda a bacia hidrográfica é ocupada por mata nativa e o terceiro apresentou maior área ocupada por pastagem.

Realizou-se, ainda, a simulação hidrológica com o cenário observado. Os resultados da pesquisa mostraram que o cenário com pastagem apresentou maior valor médio de vazão em

comparação com o observado, cerca de 20% maior. Ao tempo que o cenário mata nativa apresentou menor valor médio, enquanto o de agricultura gerou valor médio de vazão similar ao atual. Os autores atribuíram essa diferença de evapotranspiração das culturas à alteração dos fluxos de escoamento e infiltração.

Pôde-se observar que os resultados das pesquisas desenvolvidas com o modelo *SWAT* em relação à influência de diferentes cenários de uso e ocupação da terra são mais semelhantes entre si. Outros estudos sobre a temática podem ser vistos em Santos *et al.* (2021) e Koch *et al.* (2020).

Desse modo, com base nos estudos relatados, é possível observar que a alteração do uso e ocupação da terra pode ocasionar diversos impactos para o regime de vazão de uma bacia hidrográfica, podendo interferir na disponibilidade hídrica, assim como, na qualidade da água. Tais modificações podem causar impactos para o desenvolvimento das atividades humanas. Por isso, torna-se sempre necessário desenvolver estudos com o objetivo de analisar os impactos oriundos das alterações ambientais globais de uma bacia hidrográfica.

No entanto, não é só a evolução desordenada do uso da terra que pode ocasionar impactos adversos para o meio ambiente, interferindo no desenvolvimento das atividades humanas; Hoje um dos temas mais debatidos, tanto na mídia, quanto no setor acadêmico, é a questão referente às alterações climáticas que também podem impactar adversamente a disponibilidade da água das bacias hidrográficas, como será visto a seguir.

#### 5.4. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MODELOS DE CIRCULAÇÃO GLOBAL (MCGS)

Um fator de grande importância para os processos hidrológicos é a variabilidade climática que uma determinada região apresenta (NUNES; LOMBARDO, 1995). Uma variável climatológica que pode influenciar os componentes dos processos hidrológicos é a variabilidade espaço-temporal da precipitação (SILVA; NERY, 2012).

Diversos são os estudos que objetivam analisar a distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica ao longo do tempo e do espaço. Essa variabilidade espaço-temporal já é bastante observada naturalmente, porém pode ser agravada devido às mudanças climáticas.

As mudanças climáticas são influenciadas pelo desenvolvimento das atividades humanas e estão associadas à emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, podendo afetar o ciclo hidrológico de bacias hidrográficas.

Porém, torna-se necessário entender a diferença entre variabilidade climática, anomalia climatológica e mudança climática. Nesse sentido, a variabilidade climática é uma variação das

condições do clima em torno da média climatológica, sendo melhor compreendida considerando o período sazonal, interanual e interdecadal.

Já o termo anomalia climática é utilizado para se referir a flutuações extremas de um elemento em uma série climatológica, apresentando desvios acentuados do padrão observado. A mudança climática, por sua vez, é um termo designado para se referir a uma tendência de alteração da média no tempo (TUCCI, 2005). Esse último termo está, geralmente, associado a fatores antropogênicos.

Nesse contexto, estudos relatam que as modificações no clima podem ocorrer devido à variabilidade natural ou à antropogênica interna ou externa ao sistema climático, sendo a primeira expressa pela radiação solar ou atividades vulcânicas, enquanto as ações antropogênicas são principalmente devido à emissão de gases do efeito estufa (TUCCI, 2005).

Atualmente, modelos climáticos são utilizados para gerar cenários futuros do clima que são versões plausíveis. São condizentes com os padrões atuais e com as tendências em relação à emissão de gases de efeito estufa e de diversos outros poluentes atmosféricos, com o entendimento científico atual sobre o efeito desses gases sobre o clima global (IPCC-TGCI, 1999). Vários cenários podem ser utilizados para identificar a sensibilidade de um país, região ou local às mudanças climáticas.

Nesse sentido, modelos climáticos são ferramentas que têm o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão em relação às mudanças climáticas e seus diversos impactos. Tais amostras apresentam estrutura robusta e complexa e, geralmente, são conduzidos por diversas equações diferenciais utilizadas com o propósito de modelar os componentes da circulação da atmosfera e do oceano considerando o que se conhece em relação à física dos ambientes terrestres, produzindo situações climáticas simuladas em uma grade espacial (MARENGO *et al.*, 2011)

Nesse contexto, os modelos de circulação global (MCG) são modelos climáticos utilizados para gerar cenários de clima, considerando a representação dos processos físicos na atmosfera, no oceano e na superfície da terra, simulando a resposta do clima global em consequência da elevação dos gases de efeito estufa no primeiro ambiente mencionado.

Os MCGs descrevem o clima utilizando “grid” tridimensional sobre o planeta, com resolução espacial a nível global que pode variar de 250 e 600km. Os modelos de circulação global estão evoluindo consideravelmente com o propósito de apresentar resultados cada vez mais confiáveis em resoluções espaciais maiores.

As alterações climáticas causadas pela emissão dos gases do efeito estufa podem ocasionar efeitos ambientais adversos para a população (TUCCI, 2005). Nesse sentido, as previsões de mudanças climáticas globais nas últimas décadas e a especulação dos possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos sobre o planeta tem gerado grande apreensão na sociedade.

Aliado a isso, existe o fato de as previsões dos modelos climáticos desenvolvidos por centros de pesquisa de diversos países, embora discordem entre si quantitativamente, coincidirem em apontar para um cenário socioeconômico de maior estresse e conflito, devido a mudanças na disponibilidade hídrica e na geografia agrícola mundial e à maior frequência de eventos climáticos críticos.

No entanto, vale salientar que ainda existem incertezas quanto ao tema alterações climáticas. Mesmo os cientistas do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), admitem que os modelos globais são ferramentas com limitações para representar o clima global (TUCCI, 2005).

Nesse sentido, a resolução espacial (100 a 300km) pode não ser a mais indicada para avaliar mudanças a níveis regionais ou locais, e que os MCGs podem carregar incertezas em função das condições iniciais e das estruturas adotadas por esses modelos. Por isso, é como utilizar uma grande quantidade de amostras para melhor representar a parametrização, podendo isso resultar, no entanto, em maior dificuldade para compreender os resultados obtidos.

Contudo, o IPCC vem desenvolvendo análises de tendência de alterações do clima a nível global. Como resultados dessas observações, foram gerados cenários futuros de mudanças climáticas e de seus consequentes impactos para a população. Outros estudos acadêmicos utilizam os panoramas criados pelos modelos climáticos globais acoplados a modelos hidrológicos com o intuito de verificar a influência das alterações do clima no regime de vazão de bacias hidrográficas e nos componentes hidrológicos.

Existem também modelos climáticos regionais que realizam o *downscaling*, método que consiste na transferência das informações meteorológicas dos cenários de climas dos MCGs para escalas menores. Os resultados das amostras regionais são comumente utilizados para avaliar a influência de cenários futuros de clima sobre os processos hidrológicos de bacias hidrográficas.

Nesse sentido, os modelos climáticos regionais (RCM) proporcionam uma maior precisão no momento de avaliar os impactos regionais das mudanças climáticas, uma vez que

trabalham com ordem de dezenas de quilômetros, e, por isso, realizam a amostragem do clima a nível local com melhor precisão em comparação com os MCGs (SCHUSTER *et al.*, 2020).

Desse modo, além das análises climáticas realizadas em macro-escala, outros estudos procuram relacionar os efeitos das alterações climáticas em escalas menores ou microescala. A seguir será abordado um pouco sobre os cenários climáticos mais utilizados atualmente.

## 5.5.CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Como relatado anteriormente, cenários futuros de mudanças climáticas são representações presumíveis das emissões futuras dos Gases de Efeito Estufa (GEE) fundamentados em um conjunto de hipóteses coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes radioativas, tais como: demografia, desenvolvimento socioeconômico e mudanças tecnológicas. O relatório AR5 do IPCC de 2013 introduziu os novos cenários RCPs (Representative Concentration Pathways).

Tais cenários foram desenvolvidos pelo projeto *CMIP5* (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) e consideram, por sua vez, os impactos das emissões dos gases do efeito estufa e o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no planeta terra que substituíram os cenários SRES utilizados no relatório AR4.

Os RCPs são caracterizados conforme a forçante radiativa total ( $W/m^2$ ) a ser alcançada durante ou aproximadamente ao final do século XXI. Em cada RCP foi considerada uma diversidade de dados distribuídos espacialmente, como: mudanças no uso e ocupação da terra e da cobertura vegetal; emissões setoriais de poluentes do ar; além de especificar concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100 (IPCC, 2019; SILVA, 2019; ALVARENGA, 2016).

Desse modo, os cenários *RCPs* foram desenvolvidos por grupos de estudos interdisciplinares que os elaboraram utilizando um sistema completo, levando em consideração os impactos das emissões dos gases do efeito estufa e o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no sistema terrestre. Os cenários *RCPs* são: *RCP 2.6* (baixas emissões), *RCPs 4.5* e *6.0* (estabilização de médias emissões de GEE) e o *RCP 8.5* (altas emissões). Mais detalhes sobre cada RCP podem ser vistos no Quadro 1.

Em consequência da tendência do crescimento econômico, espera-se que as emissões de GEE aumentem até o final do século (O'NEILL *et al.*, 2016). Nesse sentido, o IPCC, por meio das contribuições dos membros do Grupo de Trabalho I (WGI), desenvolveu a

classificação de diferentes cenários para realizar a previsão das condições do clima no ambiente terrestre.

Quadro 1 – Caracterização dos cenários RCPs.

Cenário	Detalhamento
RCP 2.6	<p>É um cenário desenvolvido pela equipe de modelagem IMAGE da PBL (Netherlands Environmental Assessment Agency). Esse caminho de emissão é representativo de cenários da literatura que levam a níveis de concentração de gases de efeito estufa muito baixos. Essa é uma situação mais otimista de “pico-declínio”. Seu nível de forçamento radiativo primeiro atinge um valor de cerca de 3,1 W/m<sup>2</sup> até meados do século e retorna para 2,6 W/m<sup>2</sup> até 2100.</p> <p>Para alcançar tais níveis de forçamento radiativo, as emissões de gases de estufa (e indiretamente emissões de poluentes atmosféricos) são substancialmente reduzidas ao longo do tempo.</p>
RCP 4.5	<p>É um cenário de estabilização em que a forçante radiativa total é estabilizada pouco depois do ano de 2100 sem ultrapassar o nível alto do longo termo do forçamento radiativo (Clarke <i>et al.</i>, 2007; Smith e Wigley 2006; Wise <i>et al.</i>, 2009). Foi desenvolvido pela equipe de modelagem do JGCRI (Pacific Northwest National Laboratory’s Joint Global Change Research Institute) dos EUA.</p>
RCP 6.0	<p>É um cenário desenvolvido pelo time de modelagem AIM do NIES (National Institute for Environmental Studies) do Japão. Trata-se de um panorama de estabilização em que a forçante radiativa total é estabilizada pouco depois de 2100 através da aplicação de uma série de tecnologias e de estratégias para reduzir as emissões de GEE.</p>
RCP 8.5	<p>Este RCP é um cenário pessimista e é caracterizado pelo aumento das emissões de gases estufa ao longo do tempo, representando situações da literatura que levam a altos níveis de concentrações de GEE. Foi desenvolvido usando o modelo MESSAGE e pelo quadro de avaliação integrada do IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) da Áustria.</p>

Os *MCGs* oriundos do *CMIP5* são simulados nesses diferentes cenários projetados (cenários do Special Report on Emission Scenarios – SRES, do WGI), levando em consideração o histórico evolutivo de diversos fatores, como emissão de gases, concentração de GEE e informações de tipo de cobertura terrestre.

Esses cenários são denominados (desde o AR5, 2013) de RCPs. A abordagem atual emprega o conceito das forçantes radiativas e gera caminhos integrados que são úteis para a avaliação de estratégias de mitigação, de opções de adaptação e de impactos residuais.

Nos cenários intermediários (4.5 e 6.0), as emissões estabilizam-se. Porém no RCP 4.5, o aumento de radiação se estabiliza antes de 2100, enquanto que no segundo cenário essa estabilidade ocorre apenas em 2100. No cenário pessimista (RCP 8.5), o acréscimo na quantidade de GEE é na ordem de quatro vezes superior aos dos demais cenários.

Tal cenário é caracterizado pelo aumento constante da radiação provocada pelo crescimento na emissão de GEE em maior concentração. Geralmente, as pesquisas que utilizam essas amostras para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre bacias hidrográficas utilizam os cenários 4.5 e 8.5.

No AR5 (IPCC, 2014), é detalhado que as emissões e forçantes radiativas são compostas principalmente pela contribuição das emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). As categorias dos cenários do IPCC, entretanto, resumem a ampla gama de cenários de emissão publicados na literatura científica e são definidos com base nas concentrações totais equivalentes de  $CO_2$  (em ppm).

## 5.6. MODELAGEM HIDROLÓGICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Para modelagem hidrológica, a variação climática que uma região pode apresentar é uma característica que deve ser levada em consideração para o desenvolvimento de uma simulação mais realista da bacia hidrográfica. Em relação à precipitação pluviométrica na modelagem hidrológica, alguns estudos mostram variabilidade climática com base na vazão observada e calculada, já que a precipitação repercute diretamente sobre seu regime das bacias hidrográficas.

Em relação aos processos hidrológicos, as alterações climáticas se refletem nas modificações das variáveis: precipitação, temperatura do ar, vento, radiação, umidade relativa, ou seja, variáveis representativas do clima. No ciclo hidrológico, a distribuição temporal e espacial da precipitação pluviométrica e evapotranspiração são variáveis de entrada na bacia, que podem produzir alterações nas estatísticas das séries de vazões líquidas e sólidas entre outras variáveis de resposta da bacia hidrográfica (TUCCI, 2005).

Diversos estudos realizados a nível mundial em relação a mudanças climáticas e aos recursos hídricos apresentam três tipos de resultados: incrementos e reduções no escoamento superficial, sendo o primeiro caso encontrado nas regiões com altas latitudes e em parte dos

Estados Unidos; e o segundo na África ocidental, no sul da Europa e em parte da América do Sul; existem, também, regiões em que não são encontradas alterações negativas ou positivas no escoamento superficial (SANTOS *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2010; BATES *et al.*, 2008). Já a nível de Brasil, as maiores bacias hidrográficas têm apresentado reduções no escoamento superficial e em outras há tendência de aumento (MARENGO, 2006), mostrando que o resultado pode variar de bacia para bacia hidrográfica e de uma região para outra.

Por outro lado, alguns estudos têm mostrado, a partir de indicadores de extremos climáticos, que as modelagens hidrológicas as quais utilizaram dados oriundos do modelo regional Eta, acoplado à amostra climática do sistema terrestre *HadGEM2-ES*, apresentam tendências para condições mais úmidas no período de 1961 a 1990 (período baseline) em grande parte do continente Sul-americano (CHOU *et al.*, 2014; HAYLOCK *et al.*, 2006). Por outro lado, as modelagens que utilizaram dados do modelo Eta acoplados às amostras climáticas do sistema terrestre *MIROC5* e *BESM* apresentam tendências de clima mais seco para maior parte da América do Sul, em particular, na porção norte do continente (BRITO *et al.*, 2019; MARENGO, 2004).

Em função das tendências dos resultados apresentados pelo modelo climático regional Eta e pelos cenários do *HadGEM-ES*, *MIROC5* e *BESM*, serão apresentados estudos que adotaram alguns desses panoramas climáticos independente de o clima ser úmido, semiárido ou árido, visando auxiliar outros pesquisadores em uma melhor compreensão de tais cenários que apresentam tendências ou padrões comportamentais, corroborando em sua escolha de situações específicas para aplicações futuras em relação à modelagem hidrológica.

Kusangaya *et al.* (2014) desenvolveram um estudo de levantamento da revisão bibliográfica sobre a temática do impacto das alterações climáticas sob os recursos hídricos na África Austral. De acordo com os autores supracitados, a maioria dos estudos sobre a África Austral prevê um aumento da temperatura em cerca de 3°C.

As projeções mostram que é provável que as zonas áridas e semiáridas fiquem mais secas devido às alterações climáticas do que as mais húmidas em países como a Tanzânia ou a Zâmbia. Muitos modelos preveem que até 2050, o interior da África Austral registrará uma diminuição das chuvas durante a estação chuvosa devido a reduções na humidade do solo. Prevê-se que o escoamento dos rios e a disponibilidade de água diminuam entre 10 e 30% nos trópicos secos. A conclusão geral da maioria dos estudos é que se prevê a diminuição da vazão até 2050.

Ainda em relação ao continente africano, de acordo com Diki *et al.* (2015), o modelo HadGEM2-ES projeta para o final do século XXI uma África do Sul chuvosa, uma mudança no ciclo de cheias/secas nos Trópicos e um aquecimento em todo o continente, variando entre 3 e 7 °C. O desempenho do *HadGEM2-ES* para a Nigéria mostra boa reprodução dos ciclos sazonais de precipitação para alguns locais, fora da ZCIT. Contudo, a comparação com medições *in situ* em *Ilorin* e *Lagos* mostram que o modelo não está sendo capaz de reproduzir o ciclo anual de precipitação, uma vez que as projeções futuras para a Nigéria mostram elevação da temperatura e um aumento da precipitação, especialmente na parte norte do país.

Alemayehu *et al.* (2020) analisaram as projeções climáticas na Etiópia (África) em relação às alterações projetadas na precipitação e à temperatura com base em três modelos de circulação global: *CCSM4*, *HadGEM2-AO* e *MIROC5*. Os autores supracitados observaram que os cenários climáticos preveem um aumento da temperatura e da precipitação.

A maioria dos estudos desenvolvidos no Brasil com cenários climáticos são referentes à bacia hidrográfica do rio Amazonas, suas previsões de mudanças climáticas dos modelos do sistema terrestre que utilizaram os cenários de emissões do AR5 apontam para uma diminuição no regime de precipitação pluviométrica e para uma elevação da frequência de eventos extremos em grande parte da Amazônia ocidental (SORRIBAS *et al.*, 2016; SIQUEIRA JUNIOR *et al.*, 2015; CHOU *et al.*, 2014; MARENGO *et al.*, 2012; MARENGO *et al.*, 2011).

Para a bacia hidrográfica do rio Amazonas, os efeitos das mudanças climáticas sobre o regime de vazão são reduções das vazões de baixa e elevação das vazões altas quando associado a mudanças climáticas e à alteração da cobertura vegetal de floresta para pastagem (SIQUEIRA JUNIOR *et al.*, 2015).

A nível regional, Silva *et al.* (2023) avaliaram as projeções de precipitação pluviométrica do modelo climático regional Eta nos cenários *HadGEM2-ES* e *MIROC*, tanto no RCP 4.5 quanto RCP8.5, nas bacias hidrográficas dos rios São Francisco e Paraíba do Sul. Os autores constaram que o modelo representou adequadamente as simulações do clima presente.

No entanto, verificaram que as projeções modelo Eta discordaram no sinal de mudança com seus forçantes GCMs e outros modelos *CMIP5* nas bacias analisadas, amplificando para um clima mais seco. Além disso, foi possível perceber reduções na precipitação nas duas bacias hidrográficas, com maior intensidade no cenário RCP8.5, que variou em até -20% na bacia hidrográfica do rio São Francisco e 15% na bacia do rio Paraíba do Sul pelos modelos *CMIP5* e em até quase -40% para os modelos *Eta-HadGEM2-ES* e *Eta MIROC5*.

Outro estudo a nível regional foi desenvolvido por Adam *et al.* (2015) que realizaram a simulação na bacia hidrográfica do rio Paraná (com área de 800.000 km<sup>2</sup> ao longo de seis estados brasileiros, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e Distrito Federal). Nesse estudo, foi utilizado o modelo hidrológico distribuído *MGB-IPH* para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as vazões máximas e mínimas em diferentes pontos de controle na bacia do rio Paraná por um período de 30 anos. Para tanto, foram utilizadas projeções de variáveis climáticas de quatro membros do modelo climático regional *Eta-CPTEC* para executar o modelo.

Os resultados obtidos pelos autores supracitados mostram que os impactos sobre as vazões são extremamente dependentes do cenário do modelo utilizado para obter as projeções climáticas. Além disso, foi observado que as vazões máximas projetadas estão dentro dos limites de incerteza em relação às séries em cenários atuais. Os autores ainda observaram que a variabilidade natural do clima pode apresentar grande importância em comparação à influência de mudanças climáticas sobre o regime de vazão da bacia hidrográfica em estudo.

Arroio Junior e Mauad (2015) também desenvolveram um estudo com o objetivo de avaliar impactos de cenários climáticos sobre o regime de vazão na bacia hidrográfica do rio Feijão – SP. Os autores utilizaram o gerador climático estocástico *LARS-WG* para gerar séries sintéticas diárias para os cenários B1, A1B e A2 do IPCC, sendo utilizado o modelo hidrológico *SWAT*.

Os resultados obtidos pela pesquisa supracitada mostram, para a década de 2050, aumentos nos volumes de vazão em todos os cenários, com exceção do cenário A2 no período seco, no qual foi observada uma redução de -1,5% a -3%. Na década de 2090 o cenário A1B apresentou redução de vazão de março a outubro, enquanto no cenário A2 tal redução foi observada entre os meses de fevereiro e outubro, chegando a um decréscimo de -10%, isso quando comparado às vazões dos cenários atuais. Isso indica que a bacia hidrográfica é bastante vulnerável a possíveis alterações climáticas, podendo estar susceptível aos problemas de disponibilidade hídrica no futuro.

Além disso, foi observado que em cenários com elevação da temperatura e maior volume de precipitação, existe uma tendência para maiores valores de evapotranspiração e escoamento. Em situações de aumento da temperatura e da diminuição do volume precipitado, há uma tendência para um maior valor de evapotranspiração, bem como para a diminuição do escoamento e da infiltração. Assim, os resultados obtidos foram conforme o esperado, uma vez

que a precipitação pluviométrica é a principal fonte de recarga dos aquíferos. Desse modo, menores volumes de chuva tenderam a gerar menores volumes ecoados superficialmente.

Em relação a bacias hidrográficas de regiões semiáridas, Silveira *et al.* (2016) verificaram que as projeções da precipitação pluviométrica e da temperatura dos modelos globais *CMIP5* para a bacia hidrográfica do Rio São Francisco apresentaram tendência positiva para a elevação da temperatura. Em relação a volumes de precipitação pluviométrica, os autores perceberam projeções de anomalias variando de -20% a 20% para RCP 4.5 e RCP 8.5 a cada 30 anos para essa variável.

Silva (2019) também buscou avaliar os impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica de clima semiárido - a bacia hidrográfica do rio Salgado. O autor utilizou o modelo hidrológico *SWAT* e selecionou duas amostras de circulação atmosférica que apresentaram comportamentos divergentes dos dados históricos, sendo o modelo *IPSL-CM5A-LR* e o modelo *NoerESM1-m*.

Os resultados mostraram que o modelo *NoerESM1-m* apresentou diminuição na vazão média mensal que pode chegar aos 41%, impactando consideravelmente a disponibilidade hídrica da bacia. O modelo *IPSL-CM5A-LR* mostrou elevação da vazão média mensal entre 167% e 1045%.

Diversos autores vêm analisando os dados de precipitação oriundos dos modelos climáticos terrestres. Um exemplo desse tipo de estudo foi desenvolvido para uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe que fica localizada no semiárido cearense considerando o Modelo *Eta-HadGEM* (período baseline 1961-1990).

De acordo com Maia *et al.* (2016), o modelo regionalizado *Eta-HadGEM2-ES* apresentou pouca destreza na reprodução dos padrões espaciais da precipitação pluviométrica mensal na sub-bacia avaliada, revelando predominância para a superestimação no mês de fevereiro e ocorrência de subestimação da chuva em toda a sub-bacia entre os meses de março a maio. No entanto, o modelo reproduz adequadamente o ciclo anual da chuva.

Um outro exemplo de estudo de análise das variáveis climatológicas de modelos climáticos foi desenvolvido por Tanajura *et al.* (2007). Os autores verificaram que o modelo regional da atmosfera *HadRM3* aninhado ao modelo global *HadAM3* simulou de forma satisfatória a sazonalidade da precipitação, a temperatura e a umidade relativa em boa parte do estado da Bahia.

Contudo, foi observado que a magnitude dos valores máximos de precipitação na região litorânea foi menor que a pluviométrica observada. Os autores observaram, também, que o

modelo não produziu precipitação pluviométrica no semiárido e no oeste da Bahia entre os meses de junho a agosto, alertando para um cenário climático mais severo em comparação com o cenário observado.

O efeito das mudanças nos padrões da precipitação dos cenários futuros de clima também vem sendo analisado em bacias hidrográficas por meio da modelagem hidrológica. Um exemplo desse tipo de estudo foi desenvolvido por Valério (2014) com o objetivo de avaliar os efeitos de alterações na precipitação devido a mudanças climáticas na resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu-BA. Para tanto, foi utilizado modelo hidrológico *SWAT*.

Os resultados da pesquisa mostram, para todos os cenários avaliados, que existe uma tendência para a diminuição nos volumes de precipitação e das vazões a curto e longo prazo. O autor desse estudo ainda destaca que as projeções obtidas por meio de modelos climáticos globais apresentam grandes incertezas associadas, em particular, a simulações de longo prazo.

Comportamento parcialmente semelhante foi encontrado por Martini (2015) para uma aplicação no Rio Grande, no distrito de Camargos em Minas Gerais. Os resultados obtidos pelo autor mostram que as projeções futuras de vazões indicaram uma redução de duas de seus tipos: as médias e as representativas, não sendo observada tendência significativa para as vazões máximas. O autor utilizou o modelo hidrológico *SMAP*, que foi alimentado pelos cenários climáticos futuros do *Eta-HadGEM2*.

Alvarenga (2015) também desenvolveu um estudo com o objetivo de avaliar os impactos das alterações climáticas na Bacia Hidrográfica Lavrinha, localizada na Serra da Mantiqueira - SP, utilizando o modelo *DHSVMAs*. De acordo com os resultados encontrados pela autora, as mudanças climáticas projetadas pelo modelo climático regional *Eta-CPTEC/INPE* acoplado ao *MCG HadGEM2-ES* mostraram que houve uma diminuição da concentração de chuvas e uma elevação da temperatura do ar. Já as simulações futuras das vazões mensais mostraram que houve uma diminuição entre 20% e 77% na bacia.

Outros estudos em relação à modelagem hidrológica associados a mudanças climáticas podem ser vistos em Costa *et al.* (2022); Farinosi *et al.* (2019); Fontolan (2019); Schuster (2019); Pelinson (2019) e Nobrega *et al.* (2011). Tais pesquisas mostram que as bacias hidrográficas podem estar susceptíveis aos efeitos das mudanças do clima. Em geral, os estudos têm alertado para uma diminuição nas vazões, principalmente nos meses de estiagem, corroborando com a teoria de que as alterações climáticas poderão impactar mais fortemente as regiões áridas e semiáridas.

## 6. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a caracterização das áreas de estudo e a metodologia adotada para obtenção dos resultados de acordo com os objetivos propostos por esta pesquisa.

A figura 1 a seguir apresenta o fluxograma com as etapas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa:

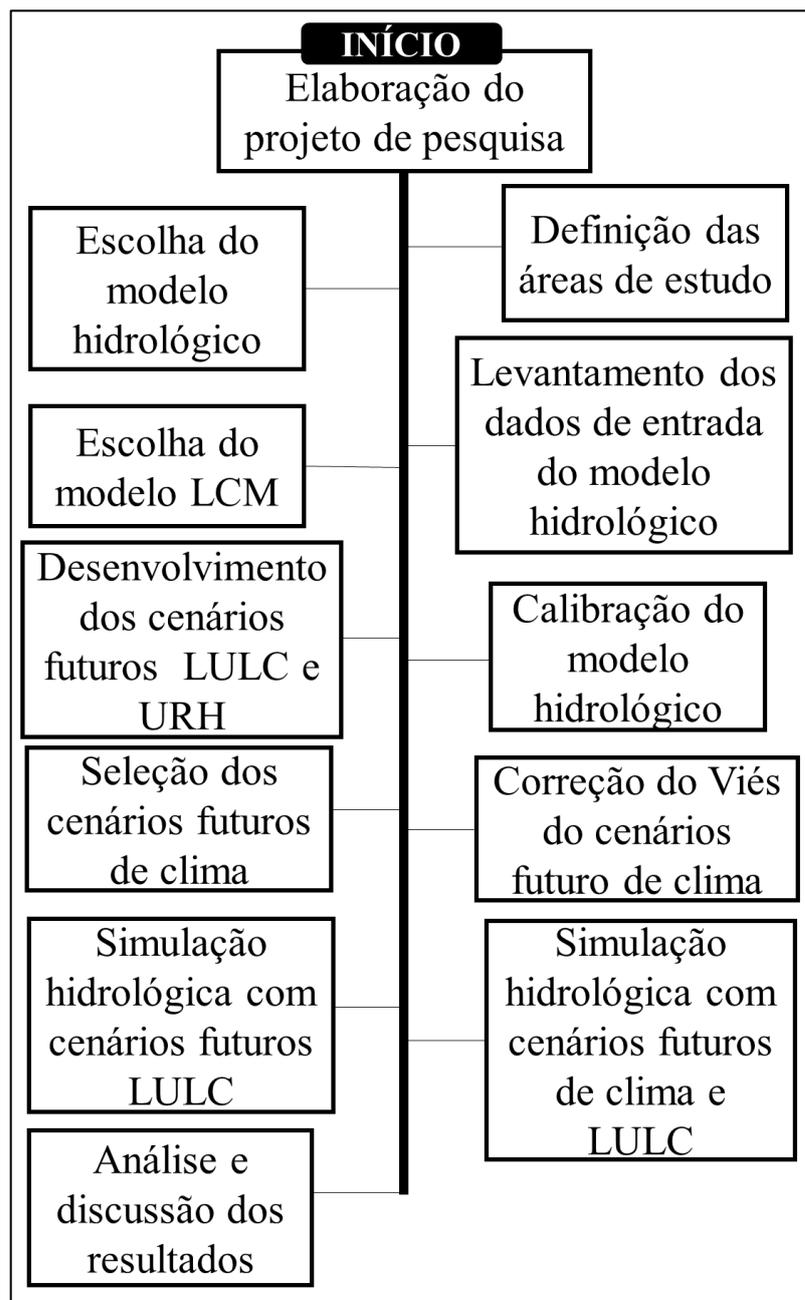


Figura 1. Fluxograma da pesquisa

## 6.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi desenvolvido em duas bacias hidrográficas localizadas no Estado de Pernambuco, as quais serão apresentadas a seguir.

### 6.1.1. Estado de Pernambuco

O estado de Pernambuco fica localizado no centro-leste da região nordeste do Brasil (Figura 1 e 2) e é banhado pelo oceano Atlântico, fazendo divisa com cinco estados: Paraíba (N), Ceará (NO), Alagoas (SE), Bahia (S) e Piauí (O), possuindo uma área de 98067,881 km<sup>2</sup>, sendo 1,152% do território nacional, incluindo em seu território os arquipélagos de Fernando de Noronha e de São Pedro e São Paulo.

Pernambuco é a sétima unidade federativa mais populosa do Brasil (9.058.155 pessoas segundo o IBGE, 2022 e 92,37 habitantes por quilômetro quadrado), possuindo o décimo maior PIB do país e o maior PIB *per capita* entre os estados do Nordeste. Seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) 2021 é de 0,719 (IBGE, 2022). Sua capital é Recife, que inclui um porto, a cidade velha e a popular área balnear de Boa Viagem. Ao largo da costa, o arquipélago vulcânico de Fernando de Noronha possui uma linha costeira dentada, praias pouco urbanizadas e um parque marítimo.

Ao sul de Recife, encontra-se a praia de Porto de Galinhas, protegida por um recife, oferecendo piscinas naturais. Ao norte encontra-se Olinda, uma cidade colonial situada entre uma vegetação exuberante. No interior do estado, os municípios mais populosos são Petrolina, Caruaru, Garanhuns e Vitória de Santo Antão.

Em relação ao relevo, o estado pernambucano possui paisagens variadas: serras, planaltos, brejos, região semiárida e diversificadas praias. As planícies litorâneas têm altitude de até 200 metros, apresentando relevo peneplano (mamelonar), enquanto alguns pontos do Planalto da Borborema ultrapassam os 1 000 metros de altitude (SACRAMENTO *et al.*, 2007).

Na margem ocidental do agreste, há a Depressão Sertaneja, sendo relativa com altitude média de 400 m que se estende até à margem oriental da Chapada do Araripe. Pernambuco faz divisa com o estado da Paraíba e o do Ceará ao norte; Alagoas e Bahia ao sul e Piauí ao oeste, sendo banhado pelo oceano Atlântico ao leste, possuindo 187 km de litoral (SACRAMENTO *et al.*, 2007).

Quanto às regiões hidrográficas do estado, existem duas que abrangem o território pernambucano: São Francisco e Atlântico Nordeste Oriental (ANA, 2022), enquanto outros dois domínios hidrográficos dividem o estado de Pernambuco, a saber: o primeiro compreende pequenas bacias hidrográficas independentes que são formadas pelos rios litorâneos os quais correm diretamente para o oceano Atlântico, emergindo as bacias dos rios Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Beberibe, Camaragibe e Una.

Já o segundo domínio é formado pela porção pernambucana da bacia do rio São Francisco, que tem como pequenos afluentes em sua margem esquerda os rios sertanejos (assim chamados por percorrerem o interior do estado): Moxotó, Pajeú, Ipanema e Riacho do Navio. Em Pernambuco, o São Francisco é o principal rio e, com exceção deste e dos rios litorâneos, todos os cursos d'água do estado têm regimes temporários, ou seja, fluem somente na estação chuvosa (APAC, 2023).

A maior parte do território pernambucano apresenta clima semiárido, caracterizado pela escassez de chuvas devido à retenção de parte das precipitações pluviais no Planalto da Borborema e às correntes de ar seco provenientes do sul da África. O índice pluviométrico varia de 400 mm e 600 mm/ano com chuvas concentradas em poucos meses, sendo as temperaturas elevadas e, em algumas ocasiões, podendo ultrapassar os 40 °C. Somente na costa litorânea e na zona da mata o clima é tropical úmido, onde os índices superam 1 500 mm ou até os 2 000 mm anuais, enquanto no agreste, área de transição entre o litoral e o sertão, variam de 500 a 900 mm/ano (APAC, 2023)

#### 6.1.2. Bacia hidrográfica do rio Pajeú – PE

A bacia hidrográfica do rio Pajeú (Figura 2) é a maior do estado de Pernambuco, apresentando área de 16.838,70 km<sup>2</sup>, que corresponde a 17% da área do Estado (PERNAMBUCO, 2022), com sua área de drenagem abrangendo 27 municípios, sendo considerado o rio principal e afluente da margem esquerda do São Francisco, o qual nasce na serra do Balanço, município de Brejinho – PE, a uma altitude de 800 m aproximadamente, nos limites entre Pernambuco e Paraíba, percorrendo uma distância de 347 km da nascente até sua foz no lago de Itaparica.

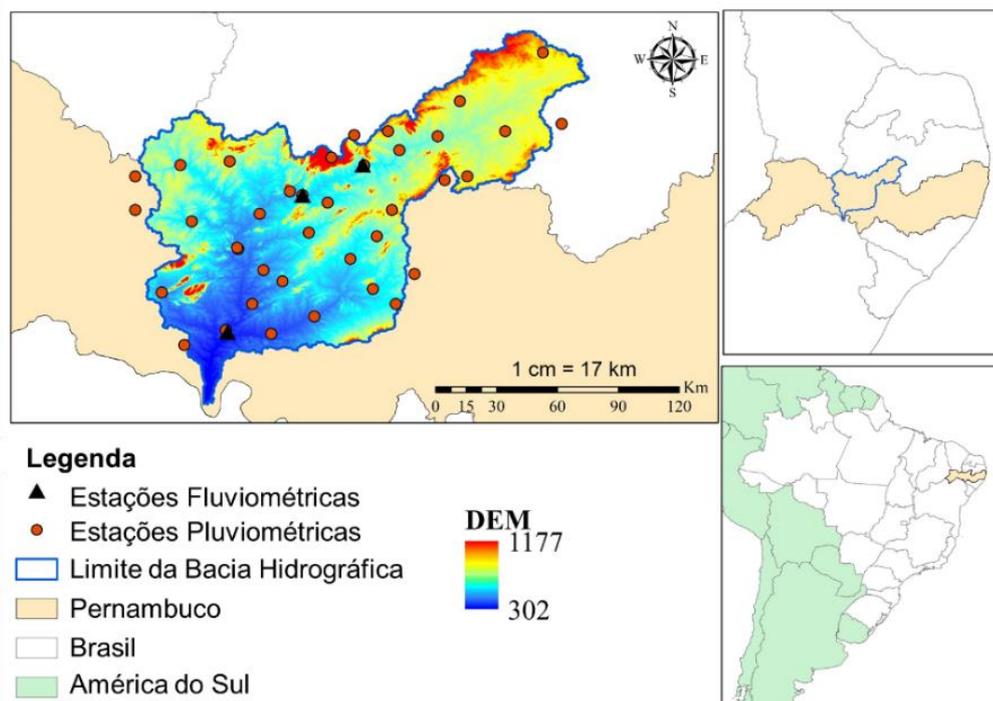


Figura 2. Mapa de localização da bacia hidrográfica e de estações pluviométricas e fluviométricas do Rio Pajeú - PE

Toda a rede hidrográfica da bacia, incluindo-se o rio principal, apresenta um regime sazonal intermitente com a interrupção do curso no período de estiagem, apresentando precipitações pluviométricas bastante irregulares. Seu curso margeia as cidades de Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada e Floresta, tendo seus afluentes principais da seguinte forma: pela margem direita, os riachos Tigre, Barreira, Brejo, São Cristóvão e Belém; e pela margem esquerda, os riachos do Cedro, Quixabá, São Domingos, Poço Negro e do Navio.

O período chuvoso se estende de fevereiro a maio condicionado pelo deslocamento anual da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema atmosférico que atua nessa área.

O clima predominante na área da bacia é o *BShw*, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, caracterizado pelo semiárido quente com chuvas de primavera-verão. No entanto, em alguns trechos de terras altas, onde a umidade é maior devido à diminuição da evaporação proporcionada por temperaturas mais amenas e favorecendo a formação de chuvas orográficas, o clima muda, sendo essas áreas classificadas como tropicais úmidas e semiúmidas.

A precipitação total pode variar de 300 a 1200 mm, com os maiores valores ocorrendo no Alto Pajeú, enquanto os menores acumulados anuais são encontrados nas áreas próximas ao

Rio São Francisco; portanto, a semiaridez é muito pronunciada (ASSIS *et al.*, 2015). A bacia hidrográfica do rio Pajeú possui um grau de suscetibilidade à desertificação com dominância das classes de “média” e “alta suscetibilidade”, sendo a retirada da cobertura vegetal o atributo de maior gravidade ao desenvolvimento do processo (FERREIRA *et al.*, 2014).

Em relação ao uso e ocupação da terra, a bacia hidrográfica não apresenta muita intervenção humana, mostrando pouca área urbanizada, cerca de 0,2%. A vegetação caatinga ainda ocupa a maior parte da área da bacia (46%), juntamente com a pastagem (46%) e apenas cerca de 4% ocupada pela agricultura (RODRIGUES *et al.*, 2013).

É importante ressaltar que a Caatinga tem uma característica bastante particular de adaptação ao clima da região, resultando em um sistema ecológico bastante diversificado. Na época de estiagem, a vegetação perde as suas folhas, facilitando assim a adaptação das plantas ao clima semiárido (SAMPAIO, 2002).

Quanto à sua divisão política, os municípios totalmente inseridos na bacia são: Afogados da Ingazeira, Betânia, Brejinho, Calumbi, Flores, Ingazeira, Itapetim, Quixabá, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo e Tuparetama. Já as cidades parcialmente inseridas na bacia são: Belém do São Francisco, Custódia, Ibimirim e Salgueiro.

Quanto à geologia, essa é caracterizada por apresentar rochas do embasamento cristalino do Planalto da Borborema, com dominância de material gnaíssico-migmatítico e superfície meta-sedimentares da Depressão Sertaneja, com grande parte constituída por litotipos metaformizados interpolados com uma superfície pedimentar e de encostas de baixo declive, apresentando altitudes médias locais, variando de 400 a 600 m (CPRM, 2023). Os arcabouços estão associados às rochas máficas, ultramáficas e graníticas, sendo possível encontrá-las em alguns locais de pediplanos (BRITO NEVES *et al.*, 1995)

Os solos do Semiárido, de maneira geral, apresentam média ou alta fertilidade com profundidade bastante variada, que está relacionada com o intemperismo das rochas. Seu surgimento está relacionado à formação geológica das rochas cristalinas e sedimentares (JACOMINE *et al.*, 1973).

Nesse sentido, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, os solos possuem dois domínios morfoestruturais, sendo que o primeiro se relaciona com áreas mais altas de domínio do Planalto da Borborema, ocorrendo de modo abrangente os Neossolos litólicos, apresentando-se rasos e com fertilidade natural que sofre variação; enquanto os Argissolos possuem boa profundidade e fertilidade natural de grande variação.

O segundo domínio morfoestrutural está relacionado às regiões mais planas e de maior parte rebaixada, como na Depressão Sertaneja, que possui solos como Planossolos, os quais apresentam fertilidade natural muito variável e os Luvisolos, que são solos rasos (EMBRAPA, 2006).

### 6.1.3. Bacia hidrográfica do rio Capibaribe-PE

A bacia hidrográfica do Rio Capibaribe localiza-se ao norte-oriental do Estado de Pernambuco (Figura 3) e nasce na serra do Jacarará, na divisão dos municípios de Jataúba e Poção, percorrendo cerca de 250 km até sua foz, possuindo 74 afluentes e banhando 42 municípios pernambucanos.

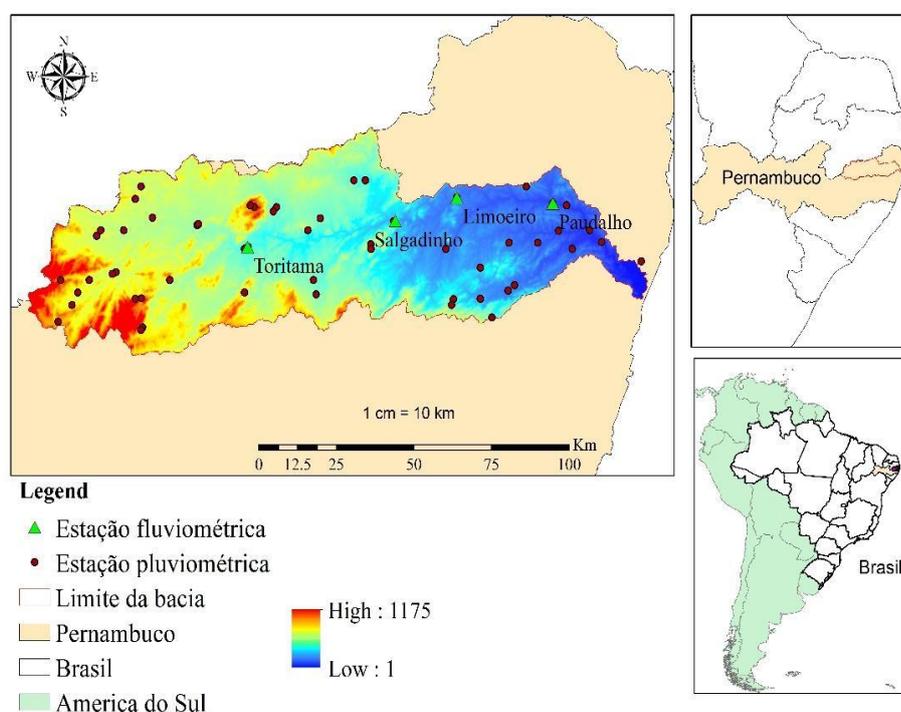


Figura 3. Mapa de localização da bacia hidrográfica e estações pluviométricas e fluviométricas do Rio Capibaribe - PE

O curso da bacia hidrográfica pode ser dividido em três partes: o alto e o médio, situados no Polígono das Secas, em que o rio apresenta regime intermitente; e o baixo curso, quando se torna perene, a partir do município de Limoeiro, no agreste do Estado. Esta bacia hidrográfica apresenta uma área de 7.454,88 km<sup>2</sup> e possui grande importância quando se refere ao abastecimento público, porém efluentes domésticos, industriais e agroindustriais são despejados em seu leito.

A APAC desenvolveu um Zoneamento por Regiões de Desenvolvimento (RD): os municípios pertencentes à bacia hidrográfica do rio Capibaribe integram as regiões de desenvolvimento do Agreste, Mata e Metropolitana. Apenas para contextualizar sua importância, na zona metropolitana encontram-se municípios como Recife, que é uma grande metrópole, e 32% de sua área encontra-se nos limites da bacia, e ainda na mesma região, encontram-se os municípios de Camaragibe, Moreno e São Lourenço da mata.

A capacidade de acumulação em reservatórios da bacia hidrográfica do rio Capibaribe é da ordem de 800 milhões de metros cúbicos. 90% de seu volume total se concentra em 5 reservatórios – os de Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá e Poço Fundo, que foram construídos por Instituições federais, caracterizando-os em águas de domínio da União nas suas respectivas bacias hidráulicas e possuindo diversas funções, como abastecimento urbano e irrigação, controle de enchentes, piscicultura e pesca (SILVA JUNIOR; SILVA, 2014).

Os mais expressivos usos ocorrem nos reservatórios, em toda a Bacia e, no próprio rio Capibaribe, apenas no seu baixo curso, que é perene. Os déficits hídricos limitam a expansão da agricultura irrigada na região com destaque para as grandes demandas para irrigação de cana-de-açúcar das usinas Petribú e São José, nos municípios de Carpina, Lagoa de Itaenga, Paudalho, Chã de Alegria, Tracunhaém e São Lourenço da Mata, já que a prioridade de uso é para o abastecimento humano (PERNAMBUCO, 2010).

Os principais conflitos pelo uso da água registrados na Bacia foram verificados no açude Carpina, sendo utilizado para controle de cheias, para abastecimento público e para a pesca. O primeiro é um uso que demanda armazenamento do mínimo volume possível da bacia hidráulica. Isso conflita com as demais formas de utilização que pretendem armazenar o volume máximo possível para assegurar as demandas necessárias para o período de estiagem. Também há registros de conflitos pelo uso da água no município de Vitória de Santo Antão em épocas de escassez, quando as captações dos irrigantes do riacho Natuba interferem em captação situada à jusante para o abastecimento público pela COMPESA (PERNAMBUCO, 2010).

A vegetação é bastante diversificada, apresentando paisagens incluídas nos biomas Caatinga e Mata Atlântica, com grande variedade de solos e de relevo sinuoso. Apresentando, também, grande intervenção humana, devido ao domínio da monocultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata e da cultura de algodão no Agreste (PERNAMBUCO, 2008).

Pela sua abrangência regional - Agreste, Mata e Litoral - a bacia hidrográfica do rio Capibaribe exhibe um ambiente complexo no qual se evidenciam contrastes climáticos de relevo, de solos e de cobertura vegetal, além dos socioeconômicos, que exigem um modelo de gestão

hídrica e ambiental que atenda às suas peculiaridades sub-regionais e locais (PERNAMBUCO, 2010).

É possível observar que a precipitação na bacia hidrográfica apresenta alta variabilidade, com valores anuais entre 600 a 2400mm, sendo influenciada, principalmente, pelos sistemas atmosféricos da zona de convergência intertropical e pelas ondas de leste. Os totais anuais apresentam uma média de 1133 mm com o aumento das medições nos postos mais próximos ao litoral (Pernambuco, 2008), enquanto os precipitados apresentaram uma média de 1133,59 mm com o aumento da precipitação na medida em que os postos se aproximam do litoral.

A evapotranspiração potencial varia de 1700 a 1850 mm no sentido de norte para sul. Com o mesmo sentido de crescimento da evapotranspiração potencial, a UA2 apresenta uma variação de 1600 a 1900 mm. Quanto à UA3, observa-se uma diminuição da evapotranspiração na medida em que se aproxima da barragem do Carpina, ao nordeste da área, atingindo um valor em torno de 1580 mm. Por fim, o comportamento desta variável climatológica dentro da UA4 apresenta valores maiores na região Sudoeste, em torno de 1700 mm, com uma diminuição em direção ao litoral, onde o valor cai para 1500 mm (PERNAMBUCO, 2010).

## 6.2. O MODELO MGB-IPH

O *MGB-IPH* é um modelo hidrológico distribuído para grandes bacias desenvolvido por Collischonn (2001) e bem descrito também em Collischonn *et al.*, (2007), sendo composto pelos módulos de evapotranspiração, de balanço de água no solo, de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo e da propagação na rede de drenagem.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a sua umidade e a sua fração de área saturada.

Na presente pesquisa, foi utilizada a versão do modelo que realiza a amostragem da propagação da vazão pela rede de drenagem por meio do método de Muskingun – Cunge. Uma das amostras simplificadas mais importantes de escoamento em rios continua sendo o modelo de Muskingum, proposto por McCarthy em 1939 (TUCCI, 2005), que foi modificado por Cunge, em 1969, para que os seus parâmetros K e X variassem no tempo, de acordo com a vazão a ser propagada. Essa versão passou a ser conhecida como modelo Muskingum-Cunge não linear (MCNL) (PONTES; COLLISCHONN, 2015).

Tal método apresenta grandes vantagens quando a celeridade da onda da cheia varia com a vazão. Isto é especialmente importante em rios com planícies de inundação, em que esse fenômeno é bastante diferente nas condições de escoamento contido na calha, ou escoamento que inunda a planície (PONTES; COLLISCHONN, 2015).

As bacias hidrográficas foram discretizadas em minibacias, sendo cada uma dividida em unidade de resposta hidrológica (URH), que são definidas de acordo com os tipos de solos e uso e ocupação da terra. Já o balanço de armazenamento daqueles é realizado de forma independente para cada URH.

A quantidade de URH a ser utilizada pelo modelo leva em consideração as análises físicas e ambientais da bacia hidrográfica. Sendo, em seguida, definidos os grupos resultantes da combinação das características do uso da terra, do tipo de solo e da cobertura vegetal, formando as URHs.

O modelo *MGB-IPH* utiliza dois tipos de parâmetros, os fixos e os calibráveis. Os primeiros são: albedo, resistência superficial, altura da vegetação e o índice de área foliar (IAF), enquanto os segundos são: armazenamento de água no solo ( $Wm$ ) e seu parâmetro da relação de armazenamento e saturação ( $b$ ); parâmetro de drenagem sub-superficial ( $Kint$ ) e de escoamento subterrâneo ( $Kbas$ ); limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou descendente ( $Wc$ ); parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo ( $Cb$ ), da calibração da propagação superficial e sub-superficial nas células ( $Cs$ ) e ( $CI$ ).

Os volumes drenados de cada mini-bacia da URH são somados de acordo com o seu tipo, ou seja, subterrâneo (DBAS), subsuperficial (DINT) e superficial (DSUP) em três reservatórios. Uma vez que eles passam por esse processo, o escoamento subterrâneo (QBAS), subsuperficial (QINT) e superficial (QSUP) são somados, resultando no escoamento gerado no interior da mini-bacia, chegando à rede de drenagem.

O balanço hídrico na camada do solo é realizado pela seguinte equação:

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_{i,j} - E_{i,j} - Dsup_{i,j} - Dint_{i,j} - Dbas_{i,j} + Dcap_{i,j}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Onde:  $\Delta t$  [dias] é o intervalo de tempo (1 dia);  $W_{i,j}^k$  [mm] armazenamento na camada superficial ao final do intervalo de tempo na URH  $j$  da minibacia  $i$ ;  $k$ , 1,  $i$ ,  $j$  e  $W$  [mm] armazenamento na camada superficial ao início do intervalo de tempo;  $i$ ,  $j$ ,  $P$  [mm/dia] precipitação menos a interceptação ao longo do intervalo de tempo no UHR  $j$  da minibacia  $i$ ;  $Dsup_{i,j}$  [mm/dia] drenagem superficial ao longo do intervalo de tempo na URH  $j$  da minibacia  $i$  (drenagem rápida);  $Dint_{i,j}$  [mm/dia] drenagem sub-superficial ao longo do intervalo de tempo na URH  $j$

da minibacia  $i$  (drenagem lenta);  $Dbas_{i,j}$  [mm/dia] drenagem subterrânea ao longo do intervalo de tempo na URH  $j$  da minibacia  $i$  (drenagem muito lenta);  $Dcap_{i,j}$  fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo ao longo do intervalo de tempo.

Para cada instante de cálculo,  $W_{i,j}^k$  e  $P_{i,j}$  são conhecidos. Ao tempo que os valores de  $E_{i,j}$ ,  $Dsup_{i,j}$ ,  $Dint_{i,j}$ ,  $Dbas_{i,j}$ ,  $Dcap_{i,j}$  são estimados com base no estado de armazenamento do início de intervalo de tempo ( $W_{i,j}^k$ ) e parâmetros do modelo.

A primeira etapa do balanço hídrico no solo consiste na estimativa do valor da precipitação pluviométrica retida ou interceptada pela vegetação antes de chegar a terra. O escoamento superficial é concebido como toda precipitação pluviométrica que cai sobre uma porção da superfície já saturada, comprovando a existência de uma relação entre o estado de armazenamento de água da chuva no solo no início do intervalo de tempo e a porcentagem de área saturada.

O escoamento subsuperficial depende das propriedades do solo, como porosidade, distribuição dos poros, a sua continuidade e os fluidos quanto à sua viscosidade e à sua densidade, levando em consideração o papel de Brooks e Corey para condutividade hidráulica, que corresponde à capacidade do solo em transmitir água (dada em  $L.T^{-1}$ ), relacionando o escoamento subsuperficial ao índice do solo ( $\lambda$ ) e à condutividade hidráulica em meio saturado ( $Kint$ ).

$$Dint_{i,j} = Kint_{i,j} \cdot \left( \frac{w_{i,j} - w_{z,j}}{w_{m,j} - w_{z,j}} \right)^{(3+2/\lambda_j)} \quad \text{quando } w_{i,j} > w_{z,j} \quad (2)$$

$$Dint_{i,j} = 0 \quad \text{quando } w_{i,j} \leq w_{z,j} \quad (3)$$

Onde:  $W_{i,j}^k$  [mm] armazenamento na camada superficial ao final do intervalo de tempo na URH  $j$  da minibacia  $i$   $w_{z,j}$  [mm] é o limite inferior de armazenamento no solo para haver escoamento superficial;  $Kint_{i,j}$  [mm/dia] é um parâmetro de drenagem sub-superficial;  $\lambda$  [-] é o índice de porosidade do solo (parâmetro).

O escoamento subterrâneo é calculado de uma forma mais simples com base no parâmetro a ser calibrado ( $Kbas$ ):

$$Dbas_{i,j} = Kbas_j \cdot \left( \frac{w_{i,j} - w_{z,j}}{w_{m,j} - w_{z,j}} \right)^{(3+2/\lambda_j)} \quad \text{quando } w_{i,j}^{k-1} > w_{c,j} \quad (4)$$

$$Kbas_{i,j} = 0 \quad \text{quando } w_{i,j}^{k-1} \leq w_{c,j} \quad (5)$$

Onde:  $w_{c,j}$  [mm] é o limite para haver escoamento subterrâneo (parâmetro);  $Kbas_j$  [mm/dia] representa o seu parâmetro enquanto drenagem muito lenta; já o  $Dbas_{i,j}$  [mm] é o próprio escoamento subterrâneo ainda em sua forma anteriormente apresentada.

Tais escoamentos referem-se àquele que deixa a camada superior do solo e não atinge de forma imediata a rede de drenagem, passando antes disso por reservatórios lineares com a função de retardar o avanço da água escoada, representando seu tempo de propagação no interior da mini bacia. Os tipos de escoamento não se misturam no interior do modelo, cada tipo daquele vai para o seu respectivo reservatório, assim como, apenas a água do reservatório subterrâneo pode voltar para a camada superficial do solo.

#### 6.2.1. Definição dos parâmetros fixos e calibráveis

Os valores desses parâmetros foram definidos a partir dos parâmetros utilizados por Felix e Paz (2016), que desenvolveram a modelagem hidrológica para uma porção da bacia hidrográfica do rio Piancó – PB, uma vez que as áreas em estudo na presente pesquisa apresentam características físicas e hidrológicas semelhantes às áreas de estudo dos autores supracitados.

Ambas as bacias hidrográficas foram calibradas com um único conjunto de parâmetros, com o objetivo de não permitir que o modelo encontre seus diferentes valores para uma mesma classe da *URH*. Além disso, o critério adotado para defini-los – *Wm* – foi a observação de que uma vegetação de maior porte tende a se desenvolver melhor em solos com maiores profundidades (MENEZES 2016; SILVA *et al.*, 2015; GALINDO *et al.*, 2008; RUGGIERO *et al.*, 2006). Esse critério foi adotado como um fator norteador no momento de atribuir valores aos parâmetros do modelo.

#### 6.2.2. Período de calibração e validação

Em ambas as bacias hidrográficas, as simulações tiveram passo de tempo diário. Entretanto, o processo de calibração e validação utilizou vazão mensal ao longo de 18 anos. Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, foi selecionado o período de 1973-1982 para o primeiro processo e 1983-1990 para o segundo. Três estações fluviométricas foram selecionadas no Rio Pajeú para calibração do MGB-IPH (Flores, Serra Talhada e Floresta).

Para a bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, o período de calibração foi 1983-1990 e a validação do modelo ocorreu no período de 1973-1982. Foram consideradas quatro estações fluviométricas: Paudalho, Limoeiro, Salgadinho e Toritama, a fim de representar toda a variabilidade climatológica da bacia hidrográfica.

É importante ressaltar que os dados para a bacia do rio Capibaribe são mais escassos no período de validação (1973-1982). Por exemplo, a estação fluviométrica de Salgadinho apresenta apenas dados observados até o ano de 1977 e Paudalho até o ano de 1976.

A escolha do período de calibração ocorreu em função do mapa *LULC* mais antigo disponível, referente ao ano de 1985, de modo que tanto o seu período, quanto o de validação estejam de acordo com um cenário *LULC* da mesma época. Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, a escolha da época justifica-se, também, devido a uma maior disponibilidade de dados pluviométricos, fluviométricos e climatológicos.

Após a calibração e validação, o modelo foi rodado para o período 1961-1990 a fim de comparação com cenários futuros do IPCC entre 2041 e 2070, considerando a época baseline e o futuro das amostras climáticas utilizadas. Esse período foi selecionado porque a proposta é analisar um horizonte de cinquenta anos futuros, bem como para entender os impactos de curto e médio prazo.

O objetivo foi comparar a vazão calculada pelo *MGB-IPH* usando forçantes climáticas do século XX e *LULC* e cenários de clima do século XXI. Também foi realizada uma comparação entre o período baseline das amostras climáticas com dados observados no mesmo período a fim de verificar se a sazonalidade está coerente.

### 6.2.3. Estatísticas do modelo MGB-IPH

O modelo foi calibrado manualmente com base na comparação do hidrograma com vazão observada e calculada, fazendo uso de três funções-objetivo para auxiliar na calibração, sendo elas: erro de volume (EV), coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) das vazões e o mesmo coeficiente para o seu logaritmo (NSlog).

Os resultados das funções *NS* e *NSlog* são considerados melhores quanto mais próximo de 1, já os das *EV* são consideradas melhores quanto mais se aproximam do zero. As fórmulas matemáticas de cada função são apresentadas a seguir:

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (6)$$

$$NSlog = 1 - \frac{\sum(\ln(Qobs(t)) - \ln(Qcal(t)))^2}{\sum(\ln(Qobs(t)) - \ln(\overline{Qobs(t)}))^2} \quad (7)$$

$$EV = 1 - \frac{\sum(Qcal(t)) - \sum(Qobs(t))}{\sum(Qobs(t))} \quad (8)$$

Onde: Qobs é a vazão observada e Qcal é a calculada.

#### 6.2.4. Dados de entrada do modelo para o modelo *MGB-IPH*

Para utilização do modelo foram levantados dados topográficos, fluviométricos, precipitação pluviométrica, clima, uso e ocupação da terra e tipo de solo. Os primeiros foram obtidos a partir do modelo digital de elevação do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros para a discretização do modelo em minibacias, obtido por meio da base de dados CGIAR (<http://srtm.csi.cgiar.org/>).

Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, foram utilizados dados de 38 estações pluviométricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). Três foram as estações fluviométricas utilizadas - Flores, Floresta e Serra Talhada - todas disponibilizadas pela ANA. Os dados meteorológicos foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo selecionada a estação meteorológica de Cabrobó.

Para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe foram utilizadas quarenta e quatro estações pluviométricas (ANA e APAC) e quatro foram as fluviométricas aproveitadas: Paudalho, Limoreiro, Salgadinho e Toritama. Os dados meteorológicos foram obtidos no INMET, sendo selecionada a estação meteorológica de Surubim.

As unidades de respostas Hidrológicas (URHs) foram definidas a partir do cruzamento dos mapas de uso e ocupação da terra disponibilizados pelo projeto *MapBiomias* (Sousa *et al.*, 2020) com o quadro de tipos de solos produzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

É importante relatar que tais mapas do *MapBiomias* foram utilizados como bases para definição dos cenários futuros de *LULC*, o que será relatado posteriormente. A seguir, será abordada a definição das URHs, por meio do cruzamento dos mapas Mapbiomas com o de tipo do solo, disponibilizado pela Embrapa.

#### 6.2.5. Definição das unidades de respostas hidrológicas (URH)

O mapa de tipo de solo utilizado é resultante de um Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE), que foi desenvolvido pela Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária de Pernambuco em convênio com a Embrapa Solos UEP Recife, com escala de 1:100.000 (<http://www.uep.cnps.embrapa.br/zape/#>).

O mapa de tipo de solo original apresentava dez classes de superfícies diferentes. Sendo que as denominadas areias quartozosas e cambissolo não apresentavam área significativa para modelagem. Nesse sentido, após realizar uma análise da distribuição geográfica e do tamanho da área ocupada por cada tipo de solo e de suas características físicas, optou-se por desconsiderá-los para a modelagem. Posteriormente, foi feita uma atualização das classes de solos de acordo com a mais recente nomenclatura da Embrapa (ano 2016).

Inicialmente, a bacia hidrográfica do rio Pajeú apresentava 12 tipos de solos antes da atualização do mapa que classificava seus tipos para a nova nomenclatura. Após essa alteração, sua quantidade passou para nove.

Após a realização de uma análise referente às características de cada tipo de solo presente na área em estudo, em especial, sua profundidade, optou-se por classificá-los em duas grandes categorias, uma para solos de maiores profundidades e outra para os de menores (Tabela 1).

Apenas por necessidade do modelo *MGB-IPH*, as classes foram chamadas de profundas e rasas. Mas é importante ressaltar que o nível de profundidade de solos nas regiões semiáridas nem sempre são tão profundos quanto aos encontrados nas localidades litorâneas. Porém, a profundidade do solo poderá definir se a vegetação caatinga será arbórea ou arbustiva, assim, há uma relação do seu porte com a profundidade daquele primeiro (MENEZES 2016; SILVA *et al.*, 2015; GALINDO *et al.*, 2008; RUGGIERO *et al.*, 2006).

O critério de definir duas classes de tipo de solo foi adotado com o intuito de diminuir a quantidade de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) resultantes do cruzamento entre os dois tipos de mapas. É importante ressaltar que foram considerados os conceitos da Embrapa para cada solo com o objetivo de definir e enquadrar cada um de seu tipo como raso ou profundo.

Tabela 1. Tipos de solos existentes na bacia hidrográfica do rio Pajeú

Tipo de solo	Classe
Brunos não cálcios	Raso
Areias quartzosas	
Aluviais	
Neossolos	
Regossolos	
Cambissolos	
Latossolos amarelos	Profundo
Planossolos	
Argissolos amarelos	
Argissolos vermelhos escuros	
Argissolos vermelhos e amarelos	

Procedimento semelhante foi realizado para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, também, após atualização das classes de solo segundo a nova nomenclatura, restaram sete de seus tipos. Sendo possível, ainda, enquadrar as superfícies do tipo neossolo e vertissolo em uma nova classe denominada solo raso, que, em geral, são terras pouco evoluídas e que apresentam baixa drenagem.

Os solos denominados argissolos e planossolos também foram enquadrados em uma classe denominada argissolos/planossolos por possuírem características semelhantes - perda de argila na camada superficial e acúmulo de argila na subsuperficial - restando os solos latossolos e luvisolos.

O gleissolo não apresentava área significativa para a modelagem, sendo assim desconsiderado. No final, esses tipos de superfícies foram enquadrados na classe denominada solo profundo (Tabela 2)

Tabela 2. Tipos de solos existentes na bacia hidrográfica do rio Capibaribe

Tipo de solo	Classe
Neossolos	Raso
Vertissolos	
Argissolos	Profundo
Planossolos	
Latossolos	
Luvisolos	
Gleissolo	

O mapa de uso e ocupação da terra foi obtido junto ao projeto Mapbiomas, sendo selecionada a representação referente ao ano de 1985 para ambas as bacias hidrográficas para definição da URH que foi utilizada no processo de calibração e validação do modelo.

Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, inicialmente existiam dez classes de uso e ocupação do solo (Figura 4). Após uma análise das características fisiográficas das vegetações e o tamanho da área ocupada por cada uma das dez categorias, foi realizada sua reclassificação, dando origem a um novo quadro de uso e ocupação da terra com cinco classes apenas (Figura 5).

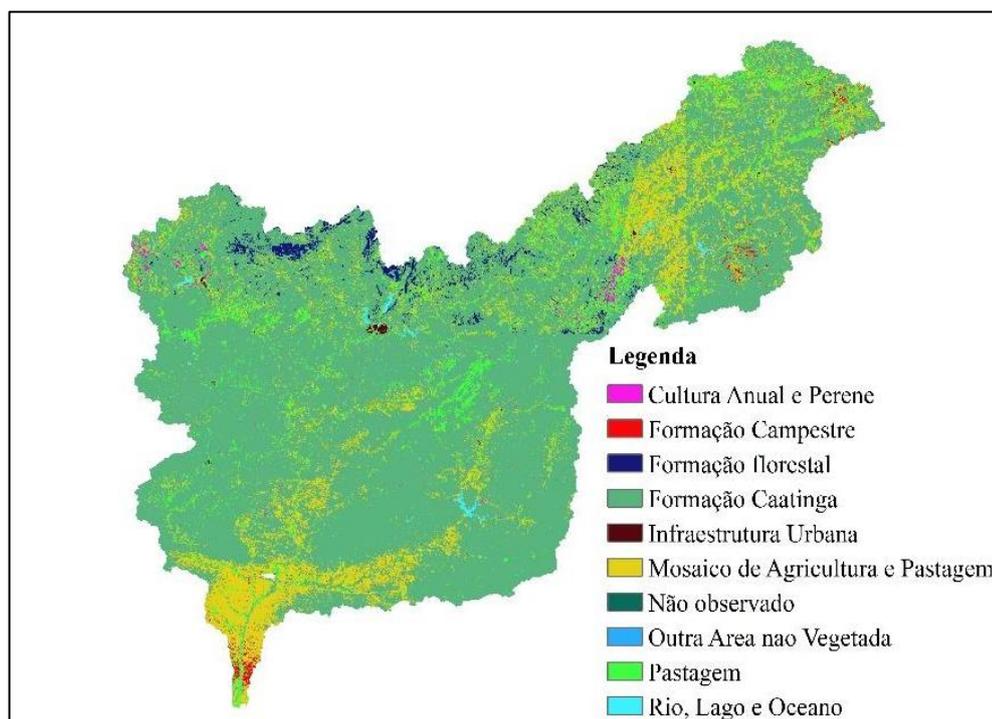


Figura 4. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Pajeú no ano de 1985

Foi observado que a formação florestal e a campestre apresentaram pouca significância em relação à área ocupada. Desse modo, optou-se por uni-las à classe de formação da caatinga. Outras categorias, como outra área não vegetada, apresentavam bem menos do que 1% de área ocupada, sendo assim a classe supracitada reconsiderada na seção de infraestrutura urbana.

Cultura anual e perene também apresentava pouca área ocupada e foi reclassificada como mosaico de agricultura e de pastagem. O resultado da reclassificação das categorias de uso e ocupação da terra para a bacia do rio Pajeú no ano de 1985 pôde ser visto na Figura 5.

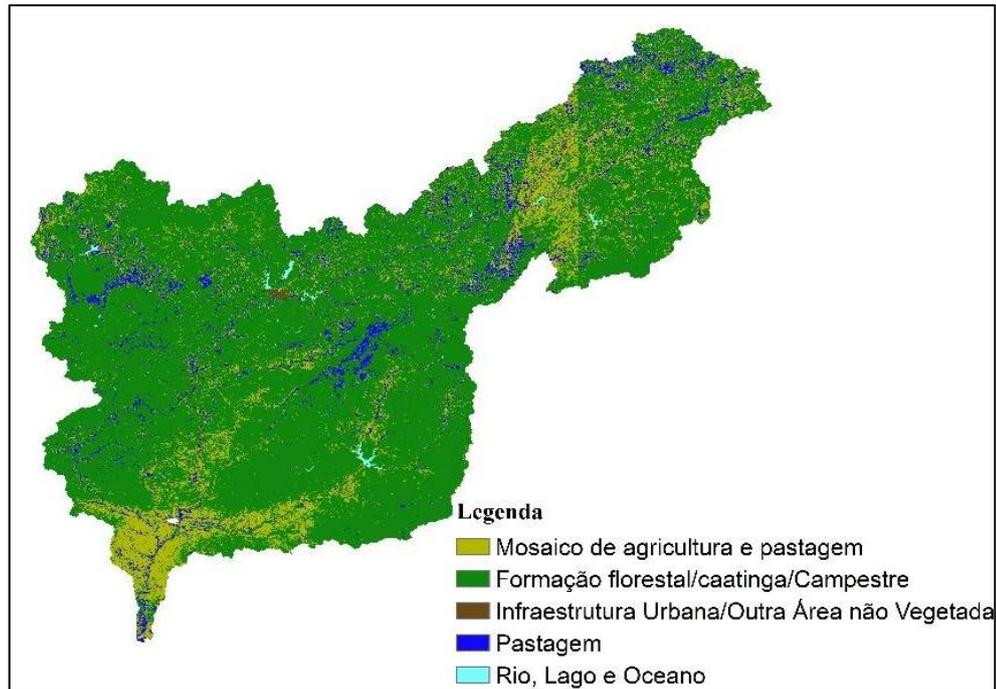


Figura 5. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Pajeú no ano de 1985 após reclassificação

Após a realização do cruzamento do mapa de tipo de solo com o mapa de uso e ocupação da terra reclassificado, foi definida a URH para a bacia hidrográfica do rio Pajeú com seis classes, sendo elas: urbano, agricultura, pastagem e caatinga com solos rasos, respectivamente; a caatinga com solo profundo e a água.

Para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, o mapa do projeto Mapbiomas referente ao ano 1985 também apresentava 10 classes de uso e ocupação da terra, conforme se vê na Figura 6. Após a realização de uma análise para verificar as características fisiográficas das vegetações e o tamanho da área ocupada por cada classe de uso e ocupação da terra, foi realizada uma reclassificação das categorias do mapa dando origem a um novo quadro de uso e ocupação da terra agora com seis classes (Figura 7).

Observou-se para bacia hidrográfica do rio Capibaribe que a área ocupada por formação florestal apresentou boa significância em relação ao seu tamanho, nesse sentido, duas foram as formações vegetais selecionadas, sendo elas: caatinga e formação florestal. Outras classes como “outra área não vegetada” não apresentaram significância em termos de área ocupada, sendo reclassificada como categoria de infraestrutura urbana.

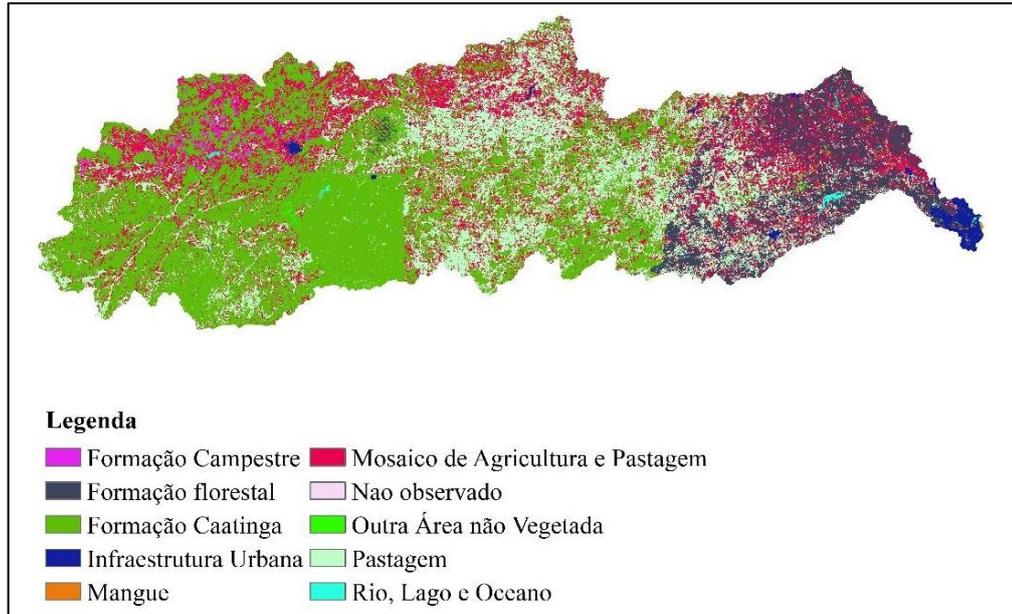


Figura 6. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe no ano de 1985

A classe mangue, que também apresentava pouca área ocupada e devido à sua localização geográfica, foi agregada à categoria de formação florestal. O resultado da reconsideração das classes de uso e ocupação da terra para a bacia do rio Capibaribe no ano de 1985 pôde ser visto na Figura 6.

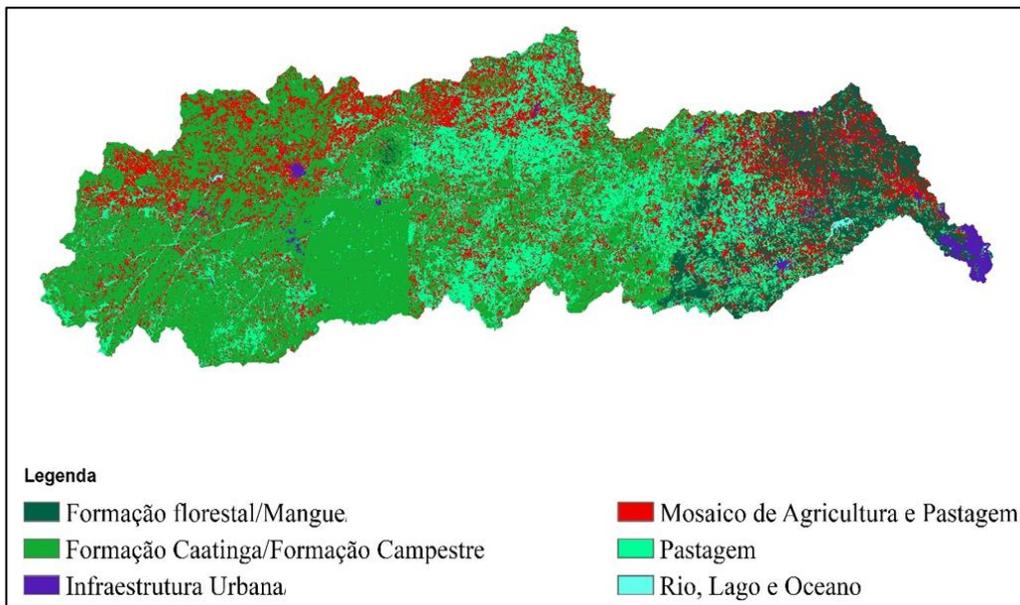


Figura 7. Mapa de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe no ano de 1985 reclassificado

A etapa seguinte foi realizar o cruzamento do mapa de tipo de solo com o de uso e ocupação da terra reclassificado, sendo definida a URH para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe com sete classes, sendo elas: floresta, urbano, Agricultura, Pastagem e Caatinga com solos profundos, respectivamente, Caatinga com solo raso e a água. É importante ressaltar que a classe floresta em Capibaribe é a mata atlântica, sendo nesta pesquisa, em termos de bacia hidrográfica, será considerado seu primeiro título (floresta).

### 6.3. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS FUTUROS *LULC*

Para definição dos cenários futuros *LULC*, foi utilizada a classificação de uso e ocupação da terra desenvolvida pelo projeto MapBiomas (Souza et. al. 2020), que utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil.

Desse modo, foram selecionados dois mapas de cobertura e uso da terra, sendo o primeiro referente ao ano de 1985 e o segundo ao ano de 2017, os quais foram selecionados com o objetivo de proporcionar uma comparação em relação ao grau de evolução da cobertura e uso da terra, tanto para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, quanto para a do rio Capibaribe.

Tais mapas serviram de base para o desenvolvimento de cenários futuros de uso e ocupação da terra que foram desenvolvidos com o auxílio do *Land Change Modeler* (LCM) integrado ao software de *SIG TerrSET*.

No entanto, o modelo MGB-IPH foi calibrado e validado apenas com a URH referente ao ano de 1985 e o conjunto de parâmetros foi repetido para os cenários futuros tanto para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, quanto para a do rio Capibaribe. Além disso, os mapas foram reclassificados de modo a apresentarem as mesmas categorias de uso e ocupação da terra, que é um requisito do *LCM*. Nesse sentido, a reclassificação ocorreu conforme apresentando no item 3.4.2.

O *LCM* mensura mudanças de cobertura e uso da terra considerando perdas e ganhos de área por sua classe de uso, oferecendo uma previsão de tal fenômeno, identificando as áreas com persistência e de transição de uma classe *n* para uma *p* (Eastman, 2016; Uddin *et al.*, 2015).

Para tanto, foi adotado o método *MLP Neural Network* disponível no *LCM*, que é o mais indicado, uma vez que não requer intervenções do usuário e por disponibilizar informações

detalhadas sobre a contribuição das variáveis explicativas Olmedo *et al.*, 2013; Eastman, 2016; Xavier e Silva, 2018; Estoque *et al.*, 2019; Folharini e Oliveira, 2020.

A partir do quadro do *Mapbiomas*, foram realizadas as previsões de dois cenários futuros de uso e ocupação da terra para as bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Capibaribe para o ano de 2055 (esse ano foi escolhido em função da disponibilidade de dados dos cenários futuros de clima que se estende de 2041 a 2070).

Em ambos os cenários futuros de uso e ocupação da terra, optou-se por adotar um critério mais pessimista, ou seja, considerando que existem mais intervenções antrópicas. Reconhecendo, no entanto, as possíveis transições de classes de uso e ocupação da terra dos cenários observados de modo a seguir seu padrão de evolução espaço-temporal.

Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, o cenário futuro 1 foi definido com o critério de que o *LCM* deve realizar transição de área com vegetação do tipo caatinga e pastagem para agricultura, enquanto o cenário 2 considera a transição apenas da primeira para a segunda e a terceira. Além disso, foi considerado como situação ideal, em termos de conversão da vegetação natural, o cenário de uso e ocupação da terra referente ao ano de 1985, uma vez que esse apresenta pouca intervenção humana e baixo nível de urbanização.

Vale salientar que não se realizaram previsões de cenários futuros de uso e ocupação da terra com áreas urbanas, pois o *LCM* utiliza o critério de potencial de transição de classes, ou seja, quanto maior a área ocupada por uma categoria do fenômeno mencionado, maior será a probabilidade dessa classe evoluir em termos de área ocupada.

Nesse sentido, para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, de acordo com as informações do projeto *Mapbiomas*, houve pouca evolução de área urbanizada para a região em estudo até o ano de 2017, resultando, de acordo com *LCM*, em pouca probabilidade de existir um grau de urbanização elevado na bacia hidrográfica do rio Pajeú no horizonte de cinquenta anos futuros.

Para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, o mesmo critério foi selecionado. Porém, em relação aos cenários futuros, a situação 1 considerou a transição de vegetação caatinga para pastagem e agricultura e o cenário 2 considerou apenas a transição da primeira e da floresta para a terceira, pouco semelhante ao esquema da bacia hidrográfica do rio Pajeú em termos de alterações. Como a proposta é comparar os resultados da modelagem nas bacias, também não foram considerados cenários futuros com aumento da área ocupada por infraestrutura urbana para a desse rio.

A partir dos cenários futuros de uso e ocupação da terra, foi realizado o seu cruzamento com o mapa de tipo de solo atualizado, visando desenvolver as URHs do Modelo MGB-IPH.

Para validar o resultado obtido com o *LCM*, foi selecionado um terceiro mapa de uso e ocupação da terra do MapBiomias referente ao ano de 2000. A partir daí, foi realizada a previsão do cenário desses fenômenos referentes ao ano 2017, partindo do quadro do ano de 1985. Seu resultado foi comparado com o primeiro mapa de uso da terra do Mapbiomas para o ano de 2017, o que será apresentado nos resultados desta pesquisa.

Além disso, a acurácia da classificação foi medida utilizando o coeficiente Kappa, que é uma medida da concordância entre as amostras da cena e aquelas derivadas por meio da classificação da imagem de sensoriamento remoto, considerando todos os elementos da matriz de erros ou de confusão, excluindo a concordância que ocorre por acaso (ROSENFELD E FITZPATRICK-LINS, 1986; STEHMAN, 1996). A Equação 9 que representa o índice Kappa (k) foi desenvolvida por Cohen (1960).

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (9)$$

Onde  $n$  é a quantidade total de amostras;  $c$  é o número de classes;  $\sum_{i=1}^c x_{ii}$  é o somatório dos valores da linha  $i$  e da coluna  $i$ ;  $x_{i+}$  é a soma da linha  $i$  e  $x_{+i}$  a soma da coluna  $i$  da matriz de confusão.

#### 6.4. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS FUTUROS DE CLIMA

Os cenários climáticos futuros adotados foram as projeções do *Eta/CPTEC RCP 4.5*, um modelo de clima regional que usa a saída de GCMs como condição de contorno para reduzir a escala das situações de modificações climáticas (Chou *et al.*, 2011). As saídas do modelo *Eta/CPTEC* foram obtidas na plataforma Projeta (<https://projeta.cptec.inpe.br/>).

Optou-se por selecionar o cenário RCP 4.5 por apresentar condições climáticas mais amena em comparação com o RCP 8.5 que também foi utilizado como dados de entrada do modelo *Eta/CPTEC*. Além disso, para o período selecionado, tais situações não apresentam tanta diferença em relação à precipitação pluviométrica e à temperatura, que são as variáveis mais sensíveis para a modelagem. É possível saber mais sobre o modelo e os cenários oriundos em Lyra (2017); Chou *et al.* (2014a); Chou *et al.* (2014b);

Os GCMs usados no *downscaling* foram o *Brazilian Earth System Model* (BESM), o *Canadian Earth System Model* versão 2 (CanESM2), o *Hadley Center Global Environment*

*Model versão 2 (HadGEM2-ES) e o Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5 (MIROC5).*

Após o downscaling com o modelo Eta, os dados de saída são referidos como *Eta-BESM*, *Eta-CanESM*, *Eta-HadGEM* e *Eta-MIROC*, já os selecionados para a simulação hidrológica foram precipitação total (mm), temperatura do ar a 2m acima da superfície terrestre (C°), pressão atmosférica na superfície terrestre (hPa), velocidade do vento a 10 m (m/s), a radiação incidente na superfície da Terra (W/m<sup>2</sup>) e a umidade relativa.

A correção do viés de precipitação foi realizada de acordo com Bárdossy e Pegram (2011), e as demais variáveis foram corrigidas pelo método delta-change (ADAM *et al.*, 2017). É importante relatar que foi realizada uma alteração no código fonte do MGB-IPH para que o modelo passe a considerar a variável-saldo de radiação ao invés da de insolação para o cálculo da evapotranspiração potencial com o método de Penman-Monteith.

Para compatibilizá-lo com o horizonte temporal do cenário *LULC* - ano 2055 - as simulações abrangeram o período de 2041-2070. Os fluxos simulados com o modelo MGB-IPH usando esses dados são referidos como *MGB-Eta-BESM*, *MGB-Eta-CanESM*, *MGB-Eta-HadGEM* e *MGB-Eta-MIROC*. Os resultados das representações dos cenários climáticos futuros foram comparados com as do cenário climático *baseline* e também com as do *MGB-IPH* alimentando com dados observados no mesmo período do *baseline* (1961-1990).

Quadro 2. Informações sobre *BESM* e *CanESM*

BESM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre;</li> <li>• Apresenta informações detalhadas sobre fenômenos tropicais importantes, os quais não se encontram representados em outros modelos no exterior;</li> <li>• O <i>INLAND</i> é um modelo de processos superficiais e de ecossistemas naturais e agrícolas, que representa não apenas os efeitos da superfície no clima, como também seu efeito nos processos superficiais (dinâmica de ecossistemas, produtividade agrícola);</li> <li>• MODELO OCEANO ModularOceanModel fromGFDL versão MOM4p1.</li> </ul>
CanESM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consiste no modelo físico acoplado atmosfera-oceano <i>CanCM4</i> anexado a um modelo de carbono terrestre (CTEM) e a uma amostra de carbono oceânico (CMOC).</li> <li>• Os componentes terrestres e oceânicos do ciclo do carbono no <i>CanESM2</i> são operáveis para dois projetos experimentais: um modo baseado em emissões,</li> </ul>

	<p>em que a concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um traçador 3D que evolui livremente no modelo; um modo baseado em concentrações, em que a centralização atmosférica de CO<sub>2</sub> é prescrita externamente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O Modelo Canadense de Carbono Oceânico (CMOC) incorpora um módulo de química inorgânica - bomba de solubilidade - e uma amostra de ecossistema - bombas orgânicas e de carbonato - para simular a troca de CO<sub>2</sub> oceano-atmosfera;</li> <li>• A troca de CO<sub>2</sub> terra-atmosfera no <i>CanESM2</i> é modelada usando o Modelo de Ecossistema Terrestre Canadense (CTEM) (Arora, 2003; Arora e Boer, 2003; 2005) que simula três reservatórios de vegetação viva -folhas, caule e raiz - e dois de vegetação morta (folhas, caule e raiz).</li> </ul>
--	--

Quadro 3. Informações sobre HadGEM2-ES e MIROC5

HadGEM2-ES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>HadGEM2</i> representa a segunda geração de configurações <i>HadGEM</i>, com funcionalidades adicionais, incluindo uma estratosfera bem resolvida e componentes do Sistema Terrestre;</li> <li>• Ciclo do carbono terrestre - Esquema de vegetação dinâmica <i>TRIFFID</i>. Para modelar a troca de CO<sub>2</sub> entre a atmosfera e a biosfera terrestre e para adaptar mudanças na distribuição da vegetação;</li> <li>• Ciclo do carbono oceânico - Esquema de biologia oceânica <i>Diet-Haddock</i> para modelar a troca de dióxido de carbono entre a atmosfera e a biosfera oceânica;</li> <li>• Química Atmosférica - Esquema de química troposférica do UKCA. Para permitir os campos de força radiativa de ozônio e metano, os campos oxidantes de sulfato variam com a meteorologia e clima.</li> <li>• Mais detalhes sobre o <i>MIROC5</i> podem ser encontrados em Collins <i>et al.</i> (2011)</li> </ul>
MIROC5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O modelo de atmosfera é o CCSR – NIES – Frontier Research Center for Global Change (FRCGC) AGCM, que é baseado em um núcleo dinâmico espectral global e inclui um pacote de física padrão;</li> <li>• O modelo oceânico é o <i>CCSR Ocean Component Model</i>, que inclui um modelo de gelo marinho;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Um modelo terrestre que inclui um módulo fluvial também é acoplado;</li><li>• O <i>MIROC5</i> foi desenvolvido com base no <i>MIROC3.2</i>, mas muitos dos esquemas foram substituídos como segue. Mais detalhes sobre o <i>MIROC5</i> podem ser encontrados em Watanabe <i>et al.</i> (2010)</li></ul>
--	---

## 7. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados das simulações hidrológicas das bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Capibaribe a serem analisados e discutidos no tópico de discussão, apresentando-os de fato, nesse sentido, os itens 7.1 e 7.2, ou seja, a resposta do modelo hidrológico *MGB-IPH* em relação às diversas combinações realizadas.

Tais resultados são apresentados quanto à calibração e à validação do modelo *MGB-IPH*, considerando o hidrograma e suas funções objetivas. Já os referentes à influência dos cenários futuros de clima e *LULC* foram analisados a partir das vazões médias de longo prazo, mínimas, máximas e diferenças de volume em porcentagem entre os cenários. Por fim, foram calculadas as vazões  $Q_{10}$  e  $Q_{90}$  para cada situação simulada.

### 6.1. RESULTADOS DA MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PAJEÚ

#### 6.1.1. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pajeú – calibração e validação

Observa-se que o modelo *MGB-IPH* representou de forma satisfatória a sazonalidade e os instantes de subida e descida do hidrograma. A Figura 8 mostra-o para a estação de Flores para o período de calibração e validação. É possível perceber que o modelo subestimou os picos máximos de vazão para tais épocas.

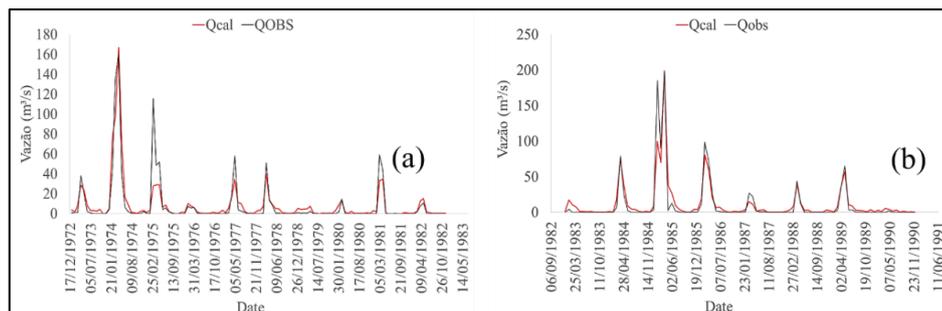


Figura 8. Hidrograma para a estação fluviométrica de Flores no período de calibração 1973 a 1982 (a) e no período de validação (b) - 1983 a 1990

A Tabela 3 apresenta as estatísticas do modelo para o período de calibração e validação da bacia hidrográfica do rio Pajeú. Percebe-se que a amostra apresentou melhores valores de NS para esse último período. Quanto às estatísticas do modelo, percebe-se que o valor de NS apresentou-se favorável ainda nesse segundo tempo, provavelmente devido a uma melhor

disponibilidade de dados. Em termos de hidrograma, percebe-se que a simulação representou de forma satisfatória a sazonalidade da bacia, conforme se observa na Figura 9.

Tabela 3. Estatística do modelo para o período de calibração e validação na bacia hidrográfica do rio Pajeú (intervalo mensal).

Estações Fluviométricas	NS		NS-Log		Erro de volume %	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação	Calibração	Validação
Flores	0,79	0,89	0,77	0,49	-0,64	-6,96
Serra talhada	0,78	0,81	0,97	0,67	2,91	-1,10
Floresta	0,70	0,84	0,53	0,64	-25,93	-11,37

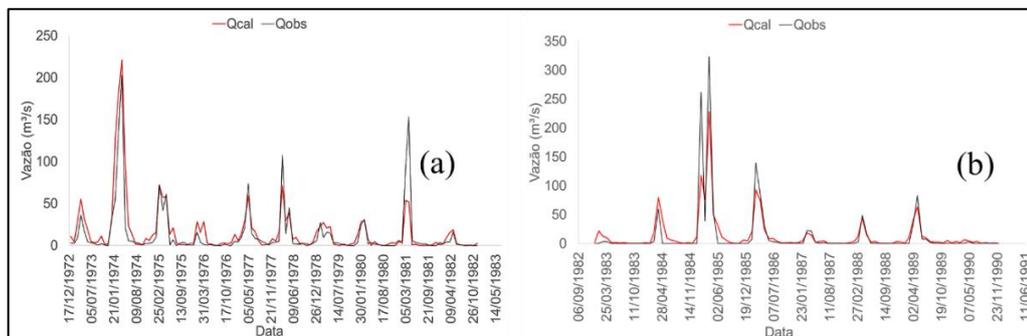


Figura 9. Hidrograma de vazão para a estação fluviométrica de Floresta no período de calibração 1973 a 1982 (a) e no período de validação - 1983 a 199 (b)

No entanto, percebe-se, também, no período de validação na estação de floresta, que o modelo subestimou os picos máximos de vazão. Para a estação de Serra Talhada (Figura 10), a amostra apresentou coeficiente de NS de 0,78 no período de calibração. Para o tempo de validação o NS foi de 0,84 (Tabela 3). O modelo também representou de forma satisfatória os momentos de subida e decida do higramma, assim como, a sazonalidade e momentos de estiagem.

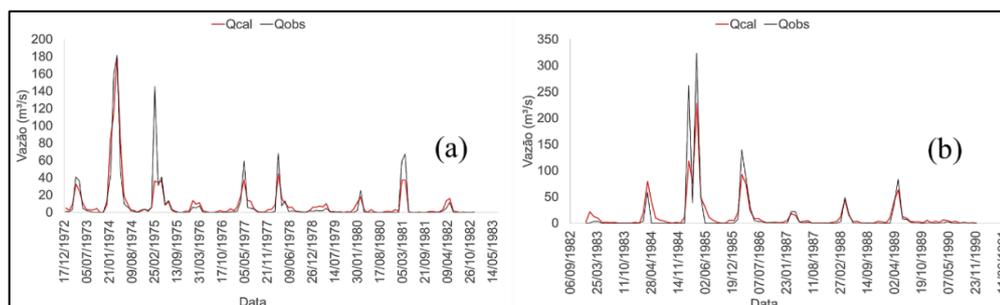


Figura 10. Hidrograma de vazão para a estação fluviométrica de Serra talhada no período de calibração 1973 a 1982 (a) e no período de validação - 1983 a 1990 (b)

### 6.1.2. Cenários do LCM para bacia hidrográfica do rio Pajeú

Como resultado da elaboração dos cenários de uso e ocupação da terra, realizado com o *LCM*, obtiveram-se duas representações futuras referentes ao ano de 2055, com a de número 1 apresentando a transição de áreas ocupadas com vegetação do tipo caatinga e pastagem para agricultura e a de número 2 apresentando a passagem de extensões com cerrado também da mesma natureza para a segunda e a terceira (Figura 11).

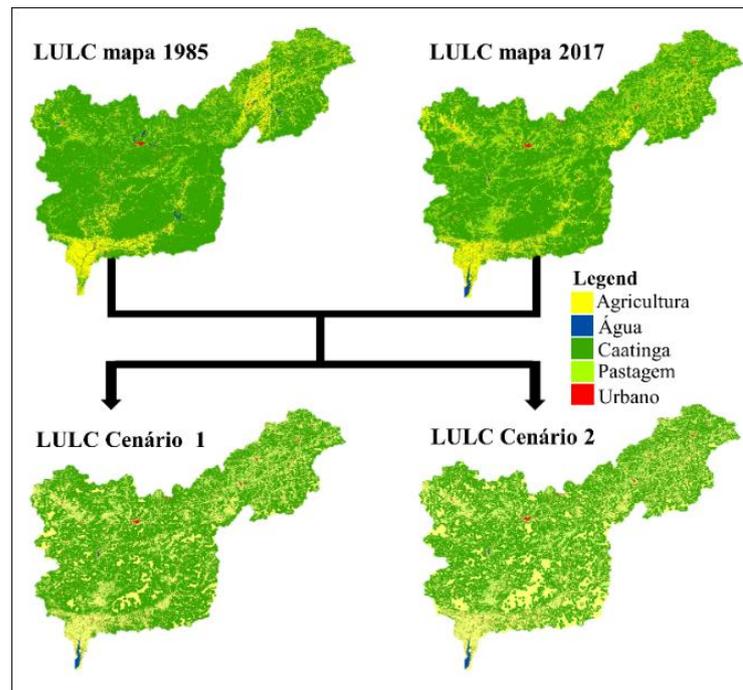


Figura 11. Cenários atuais e futuros de uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Pajeú

Percebe-se que houve variação significativa em relação à área ocupada por vegetação do tipo caatinga entre os cenários *LULC*. Em seu mapa referente ao ano de 1985, cerca de 77,34% da área da bacia apresentava esse mesmo cerrado, passando para 63,28% no cenário *LULC* 1 e para 53,68% no *LULC* 2. Já a área ocupada por agricultura era de 6,54% passando para 24,39% na primeira situação e 21,61% na segunda, enquanto a pastagem que ocupava 15,11% no mapa *LULC* 1985 passou para 11,56% no cenário *LULC* 1 e para 23,59% no cenário *LULC* 2 (Figura 12).

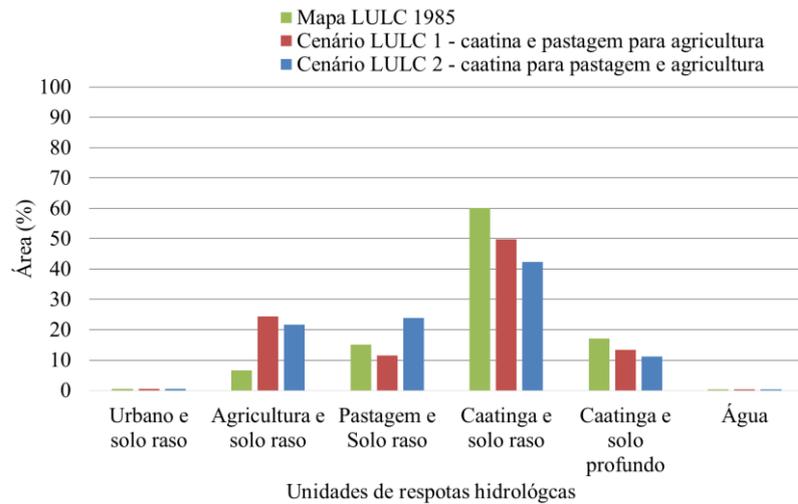


Figura 12. Unidades de respostas hidrológicas nos cenários atuais e futuros

No cenário *LULC 1* - vegetação do tipo caatinga e pastagem para agricultura - o *LCM* aumentou a área ocupada pela terceira e diminuiu as áreas ocupadas pela primeira e segunda. A dinâmica era realizar a transição de caatinga e pastagem para agricultura, percebe-se que houve uma diminuição de 3,5% na área com pastagem entre o Mapa *LULC 1985* e cenário *LULC 1*, ao tempo que ocorreu uma diminuição de 14% da área ocupada por caatinga. Houve também uma elevação percentual de 17,85% na área ocupada por agricultura no cenário *LULC 1*. Isso mostra uma probabilidade maior, entre caatinga e pastagem, dessa primeira ser substituída por agricultura, por ter perdido maior percentual de área ocupada.

No cenário *LULC 2* - vegetação do tipo caatinga para pastagem e agricultura - houve uma diminuição de 23,66% na área ocupada pela primeira e um aumento de 8,84% na área da segunda e de 15% para a terceira. No cenário *LULC 2*, ocorreu uma maior probabilidade de a área ocupada por vegetação caatinga ser ocupada também por agricultura.

O *LCM* não mostrou aumento significativo de área urbanizada, isso ocorrendo em função dos mapas de uso da terra de referências apresentarem poucas regiões desse tipo. Desse modo, percebe-se que esse cenário tende a considerar o tamanho da área ocupada para definir o potencial de transição de uma classe para a outra. Foi realizado teste de horizonte temporal de 200 anos futuros em relação à área urbanizada, mas o *LCM* não apresentou diferença significativa.

Para validar o resultado obtido com o *LCM* na geração de cenários futuros, optou-se por selecionar um mapa de uso e cobertura do solo do projeto Mapbiomas de ano intermediário entre o período de 1985 a 2017, sendo o selecionado o referente ao ano de 2000.

Após uma breve análise, percebeu-se que a principal diferença entre o mapa de uso e cobertura da terra do ano 2017 e 2000 se encontra no percentual de área ocupada por vegetação caatinga e pastagem, ou seja, o ano de 2017 apresentou menor área ocupada pela primeira e maior percentual de região povoada pela segunda.

Nesse sentido, para validar o *LCM*, foi utilizado o mapa de uso da terra do ano 1985 e 2000 de forma que o modelo gerasse cenário *LULC* referente a 2017. O resultado dessa modelagem apresentou uma resposta semelhante ao dado observado, como pode ser visto na Figura 13, com um índice Kappa de 0,89, que segundo Landis e Koch (1977) é considerado como excelente.

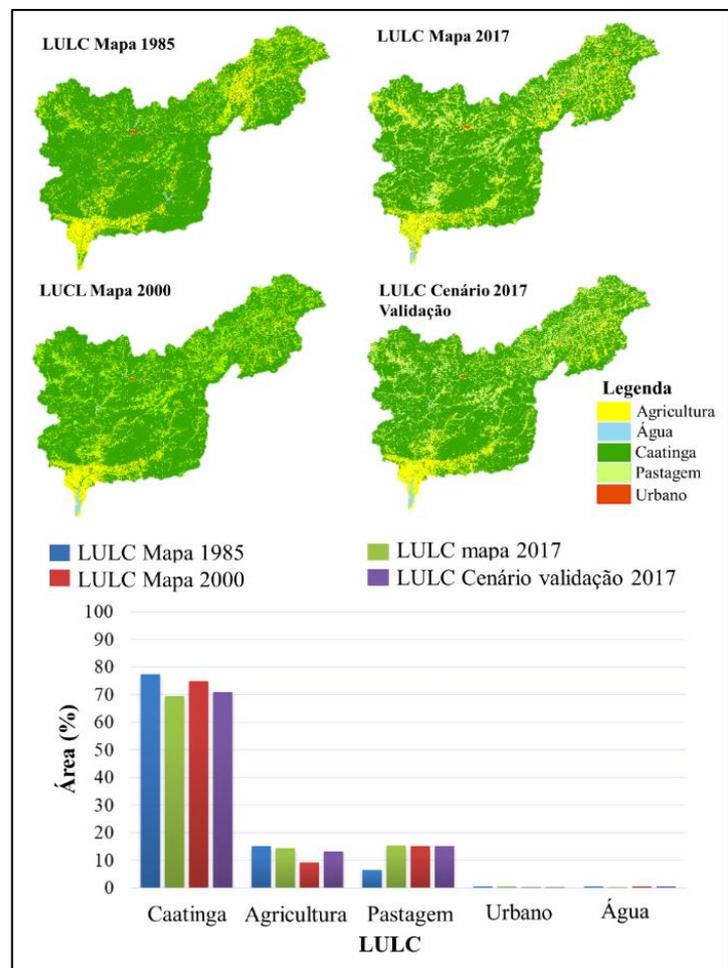


Figura 13. Validação do LCM com uso dos mapas referentes aos anos de 1985, 2000 e 2017

### 6.1.3. Simulação hidrológica dos cenários *LULC*

Para fins de avaliação da influência da evolução dos cenários de *LULC* com o *MGB-IPH* sobre o regime de vazão na área em estudo, optou-se por avaliar o clima atual associado

às situações futuras de uso e ocupação da terra e ao mapa daquele primeiro referente ao ano de 1985.

A Figura 14 apresenta a vazão média de longo prazo calculada pelo modelo *MGB-IPH* nas estações fluviométricas utilizadas na etapa de calibração, considerando os cenários de uso e ocupação da terra utilizados nesta pesquisa.

É possível perceber que a vazão foi maior no cenário com menor área florestal (cenário 2), como pode ser visto na Figura 14 a seguir. Esse resultado é semelhante ao que relata a literatura sobre o tema em questão, ou seja, que regiões ocupadas por pastagem tendem a gerar maior escoamento e vazão quando comparadas a áreas ocupadas por vegetação arbórea (BRITO NETO *et al.*, 2021; BAYER; COLLISCHONN, 2013; PERAZZOLI *et al.*, 2013; COLLISCHONN *et al.*, 2001). Os parâmetros calibráveis do modelo estão no anexo III.

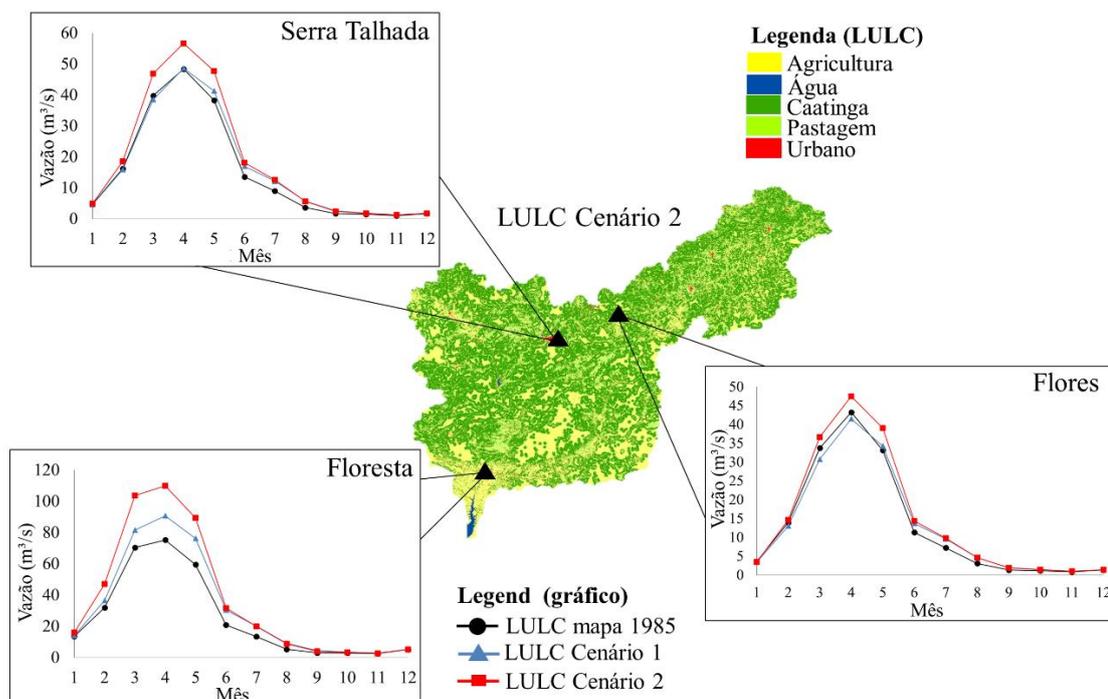


Figura 14. Vazão média de longo prazo nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da bacia referente aos cenários de uso e ocupação da terra e ao clima atual

Observa-se uma elevação em 52% na vazão média no mês de abril na simulação do *MGB-Clima* atual associado ao cenário 2 em comparação à sua modelagem associada ao mapa de uso da terra de 1985. É possível, também, observar que a região onde se localiza a estação fluviométrica de Floresta é que apresentará maiores alterações nos volumes, considerando os

diversos panoramas de uso da terra adotados na atual pesquisa, conforme se pôde ver na Figura 14.

No mês de abril, houve uma elevação da vazão de 35 m<sup>3</sup>/s no cenário 2 e 15 m<sup>3</sup>/s na situação 1 em comparação com a modelagem com o mapa de uso e ocupação da terra do ano de 1985 na estação de Floresta, conforme se pôde ver na Figura 14. É possível perceber que, na estação de Flores, o cenário 1 de uso e ocupação da terra apresentou volumes menores de vazão média de longo prazo no período de cheia.

A Figura 15 apresenta para a seção do exutório os valores médios de longo prazo da vazão, evapotranspiração real e umidade do solo para cada cenário de uso e ocupação da terra simulado pelo modelo *MGB-IPH*, considerando o clima do período de calibração (1973 – 1982).

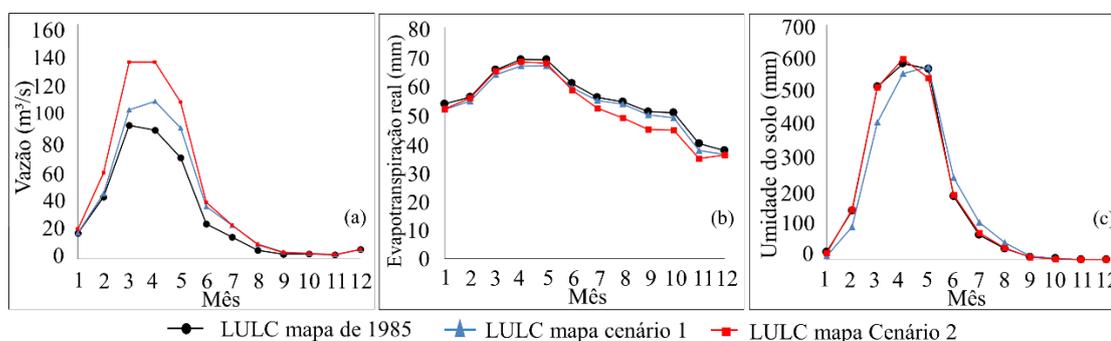


Figura 15. Valores médios de longo prazo no exutório para vazão (a); evapotranspiração real (b); umidade do solo referente aos cenários de uso e ocupação do solo e ao clima atual (1973-1982)

É possível notar que os volumes dos processos hidrológicos foram maiores no cenário com a menor área florestal (cenário 2), como pode ser visto na Figura 15. Este resultado é semelhante ao relatado na literatura sobre o assunto em questão, ou seja, que zonas ocupadas por pastagens tendem a gerar maior fluxo quando comparado com as áreas povoadas por vegetação arbórea. No entanto, o cenário 2 apresentou valores de evapotranspiração real mais baixa, principalmente durante a estação seca na bacia.

#### 6.1.4. Modelagem hidrológica dos cenários futuros de clima e *LULC* comparados ao período baseline

A Figura 16a apresenta a sazonalidade da precipitação média mensal de longo prazo e a diferença percentual entre o período baseline e o futuro de cada modelo climático. Nesse sentido, percebe-se que os volumes precipitados apresentam variações em todos os cenários (Figura 16b), sendo esse o principal motivo da divergência dos resultados apresentados nas simulações do *MGB*.

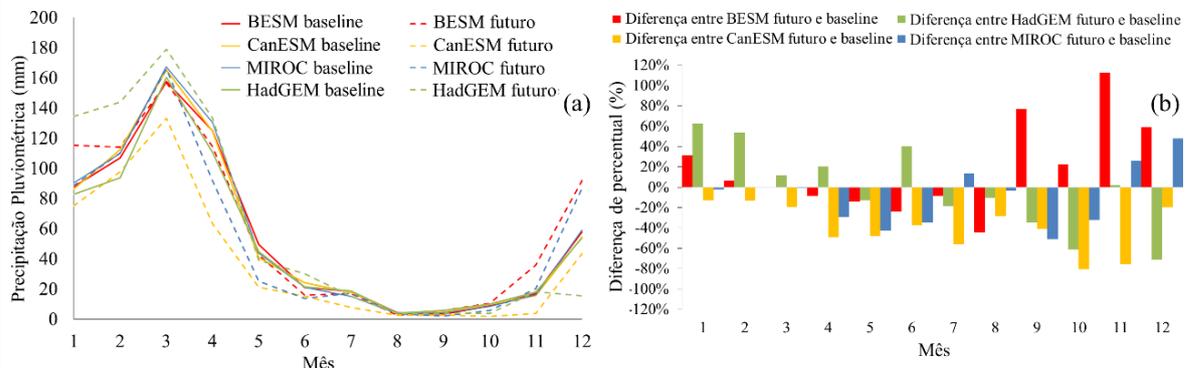


Figura 16. Precipitação média de longo prazo nos cenários climáticos futuros e baseline (a) e diferença percentual entre futuro e baseline (b)

A simulação hidrológica com o cenário do *MGB-Eta-CANESM* e *MGB-Eta-MIROC* apresentou elevação da vazão nos cenários climáticos baseline (Figura 17 a e b) em função do maior volume precipitado no respectivo cenário (Figura 16) em comparação à representação do *MGB-Eta-CANESM* e *MGB-Eta-MIROC* futuros. Quanto à modelagem dos cenários com o *MGB-IPH*, observa-se uma alteração na vazão em relação às diversas combinações dos cenários climáticos e de uso e ocupação da terra analisados.

A simulação hidrológica do *MGB-Eta-BESM* combinando os cenários *LULC* mostrou que existe uma tendência de ocorrer uma maior vazão quando associado ao *LULC 2* (Figura 17a). Sendo, também, possível observar o mesmo comportamento na rodada do *MGB-Eta-HadGEM* (Figura 17b).

Houve um aumento de 38,81 m<sup>3</sup>/s na vazão de abril no cenário futuro combinado com o *LULC 2* em relação ao *baseline* associado ao mapa *LULC 1985* no resultado do *MGB-Eta-BESM*. Em março, a diferença foi maior, de 56,91 m<sup>3</sup>/s. Para o resultado do *MGB-Eta-*

*HADGEM*, em relação aos cenários citados acima, essa diferença foi ainda maior, com aumento da vazão de 110,25 m<sup>3</sup>/s em março e 86,48 m<sup>3</sup>/s em abril.

No *MGB-Eta-HADGEM*, observa-se que a combinação do cenário 2 de uso e ocupação do solo ao de clima futuro proporcionou maiores volumes de vazão (Figura 17b) em função do maior volume precipitado na representação de clima futuro.

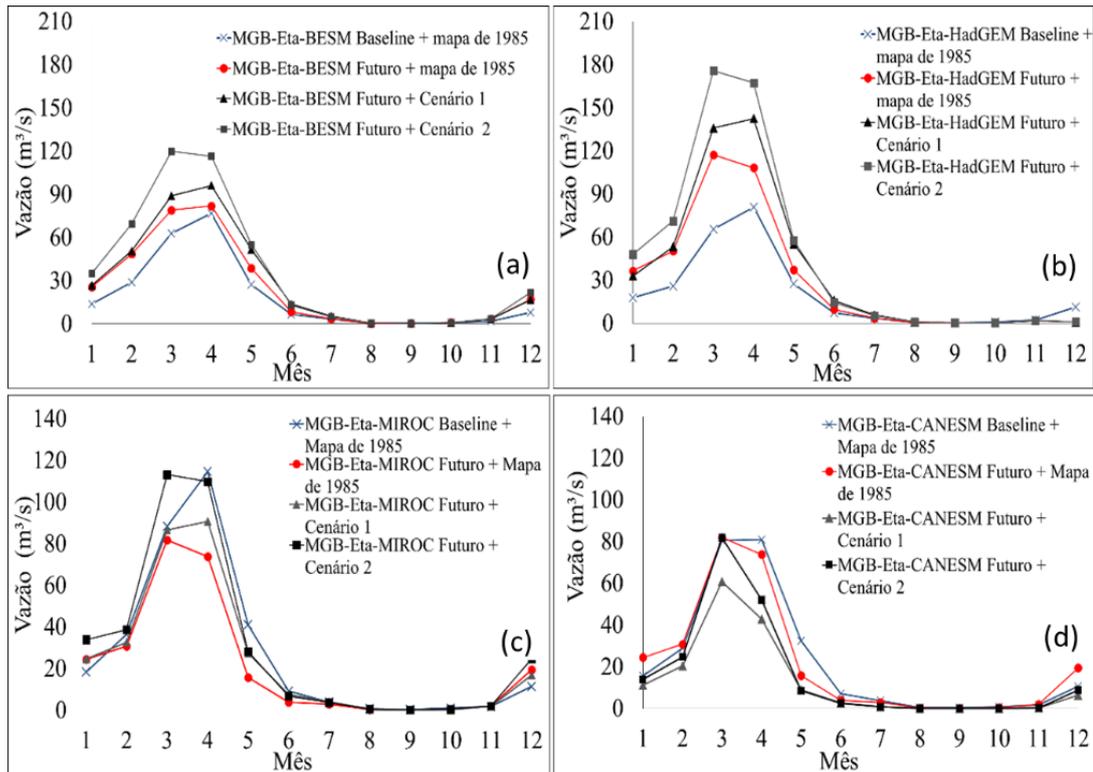


Figura 17. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia referente ao cenário de uso e ocupação da terra e cenários climáticos para *MGB-Eta-BESM* (a), *MGB-Eta-HADGEM* (b), *MGB-Eta-MIROC* (c) *MGB-Eta-CANESM* (d)

Pode-se observar, também, que o cenário 2 de uso e ocupação da terra é o que apresenta elevação da vazão, seguido do 1 e do referente ao ano de 1985, mostrando que nos panoramas com menor conservação da vegetação natural aquela tende a aumentar.

A Tabela 4 apresenta as vazões máximas, mínimas e média nos cenários *LULC* e climáticos. Observa-se que diferenças nos volumes máximo, mínimo e médio daquelas entre os cenários 1 e 2 de uso da terra ocorreram devido à variabilidade climatológica de cada representação dos modelos climáticos e, também, em função dos parâmetros fixos do modelo *MGB-IPH*.

Percebe-se também que os cenários climáticos *MGB-Eta-BESM* e *MGB-Eta-HADGEM* apresentaram elevação da vazão no panorama futuro de clima com maior magnitude quando associado ao *LULC 2*. Ao tempo que a rodada *MGB-Eta-MIROC* e *MGB-Eta-CANESM* mostraram a sua diminuição no período de clima futuro. É importante relatar que essa última sessão foi a que apresentou maior vazão máxima e média de longo prazo no período baseline.

Tabela 4. Vazões máximas, mínimas e médias nos cenários de uso e ocupação da terra e climáticos

MBG-Eta-BESM				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo	76,74	82,05	96,17	119,92
Mínimo	0,30	0,37	0,57	0,54
Média	19,33	25,74	29,65	36,85
MBG-Eta-MIROC				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo	114,73	81,92	90,96	113,27
Mínimo	0,44	0,19	0,19	0,19
Média	27,34	21,35	24,49	30,23
MBG-Eta-CANESM				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo	81,07	58,05	60,85	81,85
Mínimo	0,41	0,09	0,09	0,08
Média	22,01	11,87	12,89	16,18
MBG-Eta-HADGEM				
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo	80,94	117,36	142,46	175,84
Mínimo	0,42	0,31	0,29	0,31
Média	20,40	30,63	37,22	45,41

Ainda nesse sentido, é possível perceber que a rodada *MGB-Eta-CANESM* foi a que apresentou maior magnitude na diminuição da vazão máxima, mínima e média em comparação com as outras rodadas do MGB. Porém, é preciso se atentar para a divergência de resultados apresentados pelos cenários climáticos, mostrando que existe sua influência nos resultados.

A Tabela 5 apresenta os valores da vazão  $Q_{10}$  e  $Q_{90}$  a nível mensal para a simulação hidrológica nos cenários de uso e ocupação da terra atual e futuros associados aos panoramas

de climas também presentes e vindouros, tendo em vista que a bacia hidrográfica do rio Pajeú passa boa parte do ano hidrológico com vazão baixa entre os meses de julho a novembro.

Tabela 5. Vazões  $Q_{10}$  e  $Q_{90}$  a nível mensal nos cenários de uso e ocupação da terra e climáticos

MBG-Eta-BESM				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	55,35	84,88	89,38	112,31
$Q_{90}$	0,02	0,06	0,07	0,06
MBG-Eta-MIROC				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	91,98	65,89	76,25	85,62
$Q_{90}$	0,03	0,00	0,00	0,00
MBG-Eta-CANESM				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	62,39	33,67	37,67	45,72
$Q_{90}$	0,03	0,00	0,00	0,00
MBG-Eta-HADGEM				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	59,16	96,10	106,90	133,70
$Q_{90}$	0,04	0,82	1,18	1,04

É possível perceber que o resultado do modelo *MGB-IPH* com os cenários *LULC* e clima atual e futuro apresenta uma significativa elevação na vazão de cheia  $Q_{10}$  na rodada *MGB-Eta-BESM* e *MGB-Eta-HADGEM* e sua diminuição nas sessões *MGB-Eta-MIROC* e *MGB-Eta-CANESM*. A magnitude da elevação daquelas varia de acordo com o cenário *LULC* associado ao climático, sendo o panorama *LULC 2* o que apresenta maior vazão.

Quanto à vazão de estiagem  $Q_{90}$  na simulação, percebe-se sua significativa elevação na rodada *MGB-Eta-HADGEM*. As outras sessões do modelo não apresentaram seu aumento positivo ou negativo, isso porque os valores se mantiveram próximos de zero.

A figura 18 apresenta a comparação da vazão calculada no período baseline dos modelos climáticos com sua versão medida utilizando-se dados climáticos observados considerando a URH referente ao mapa de 1985, sendo os dados remetidos ao mesmo período (1961 a 1990).

Nesse contexto, é possível observar que os cenários climáticos representaram satisfatoriamente a sazonalidade da vazão ao longo do tempo (Figura 18 a). Apenas a rodada *MGB-Eta-MIROC* + Mapa de 1985 apresentou sua considerável diferença no mês de abril.

A diferença da vazão entre os cenários climáticos ocorre em função das divergências nas normais climatológicas. As variáveis precipitações, temperaturas e saldos de radiação são as mais sensíveis do modelo *MGB-IPH*. É possível perceber que em relação à primeira, existe pouca diferença entre os panoramas do clima no período baseline em comparação com a precipitação observada na mesma época (1961 – 1990) (Figura 18 b).

Porém, tanto a temperatura quanto o saldo de radiação apresentaram maiores diferenças entre os modelos climáticos e dados observados. Esse é o motivo dos valores diferentes na vazão calculada durante o período baseline.

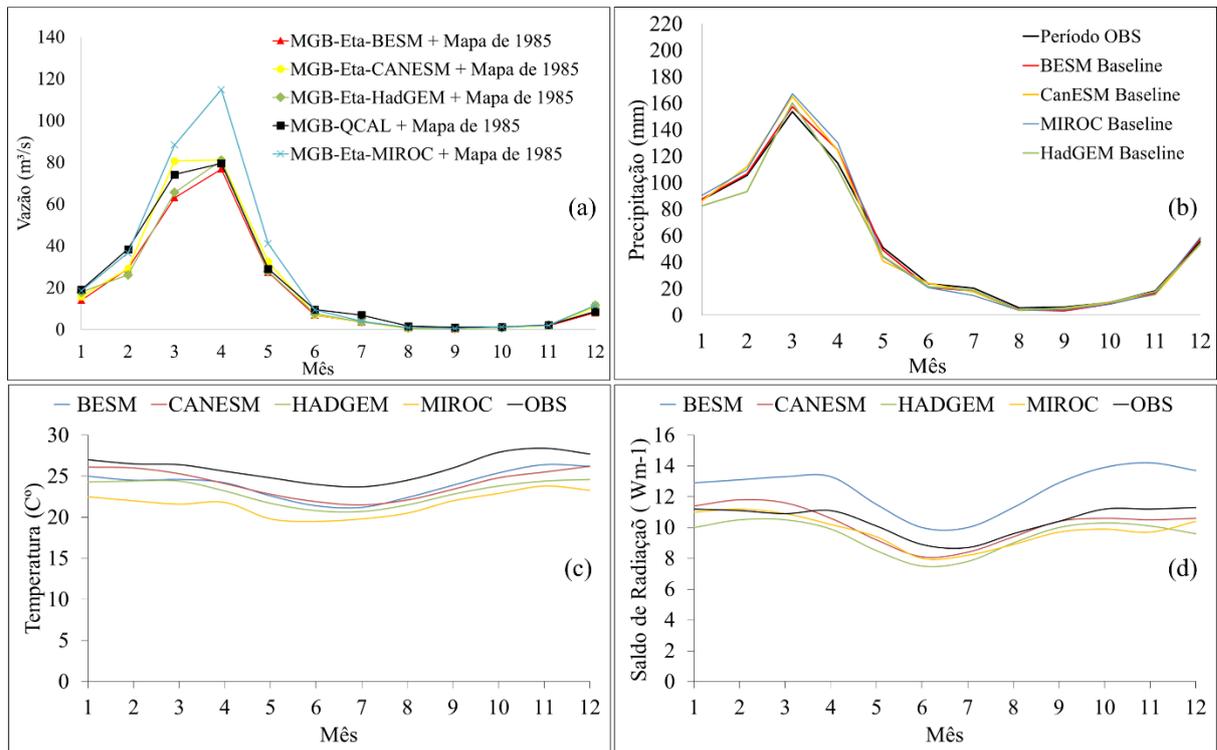


Figura 18: Vazão calculada com dados dos modelos climáticos no período baseline e dados observados (1961-1990) (a); Precipitação dos cenários climáticos no período baseline e observado (b); Temperatura dos cenários climáticos no período baseline e observado (c); Saldo de radiação dos cenários climáticos no período baseline e observado (d)

## 6.2. RESULTADOS DA MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE

### 6.2.1. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Capibaribe/PE - calibração e validação

De maneira geral, o modelo *MGB-IPH* conseguiu reproduzir satisfatoriamente a nível mensal o comportamento do hidrograma observado, tanto relacionado à sazonalidade das vazões, quanto à representação dos anos secos e úmidos, como também, ao processo de subida e descida dos hidrogramas e intensidade das cheias de pequeno e médio porte.

Em todas as estações utilizadas, esse comportamento foi semelhante tanto no período de calibração quanto no de validação. A Figura 19, por sua vez, mostra o hidrograma a nível mensal para a estação de Paudalho nas referidas épocas. Percebe-se que o modelo subestimou o pico máximo de vazão no ano 1985 no período de calibração (Figura 19a), mas a representou - intermediária e baixa - de forma satisfatória.

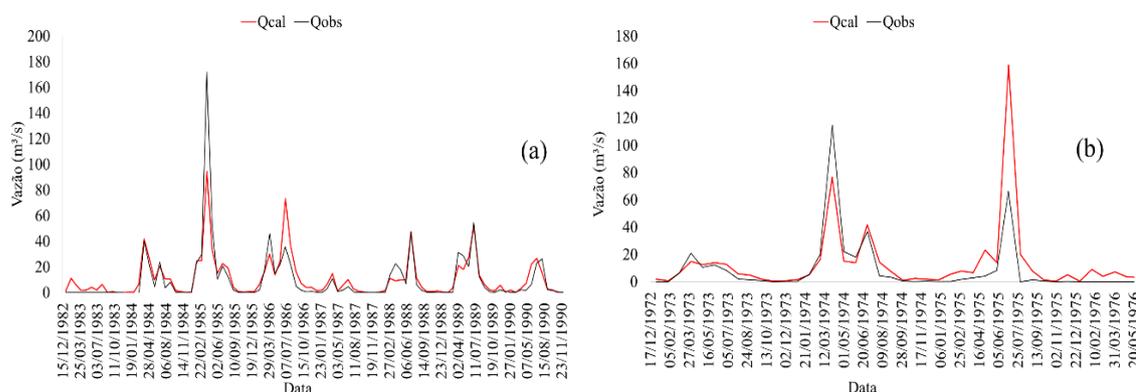


Figura 19. Hidrograma na estação fluviométrica de Paudalho no período de calibração - 1983 a 1990 (a) e no de validação - 1973 a 1982 (b).

O modelo representou satisfatoriamente a sazonalidade na estação de Paudalho e apresentou um coeficiente NS de 0,76 para o período de calibração. Na validação, o NS de 0,36 foi inferior ao primeiro, como pode ser visto na Tabela 6. Na estação de Limoeiro, os valores das estatísticas foram semelhantes aos encontrados no primeiro caso, salientando-se para um decréscimo na estatística NS no período de validação e um valor maior para o erro de volume. Mesma situação foi encontrado para a estação de Salgadinho que apresentou NS de 0,88 no período de calibração e de -2,29 na última época mencionada.

É importante relatar que o modelo foi calibrado com um único conjunto de parâmetros para se adequar ao objetivo da pesquisa em relação à modelagem dos cenários futuros de uso e ocupação da terra de modo a evitar que seus novos panoramas encontrem mais de um parâmetro para uma mesma URH.

Tabela 6. Estatística do modelo para o período de calibração e validação para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe

Estações Fluviométricas	Estatística NS mensal		NS-Log		Erro de volume %	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação	Calibração	Validação
Paudalho	0,76	0,36	0,76	0,57	9,73	50,52
Limoeiro	0,73	0,09	0,80	0,53	5,50	50,90
Salgadinho	0,88	-2,29	0,67	0,17	29,75	119,57
Toritama	0,58	0,90	0,66	0,52	-30,59	-0,86

Diferentemente das outras estações, percebe-se que a de Toritama foi a única que apresentou melhor valor de NS no período de validação, sendo a medida da estatística de 0,90. A Figura 20 apresenta o hidrograma na referida estação no período de calibração e validação.

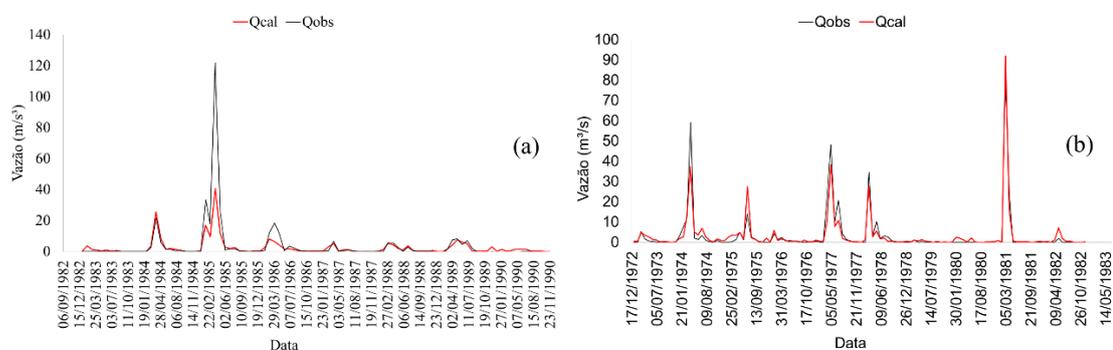


Figura 20. Hidrograma para a estação fluviométrica de Toritama no período de calibração 1983 a 1990 (a) e validação - 1973 a 1982 (b).

De maneira geral, apesar do valor inferior da estatística NS no período de validação, foi possível perceber que o modelo representou de forma satisfatória a sazonalidade e os momentos de subidas e decidas da vazão, porém ou subestimou ou superestimou alguns de seus picos máximos, o que influenciou para estatística NS inferior na referida época mencionada neste parágrafo.

### 6.2.2. Cenários do *LCM* para bacia hidrográfica do rio Capibaribe

Foram elaborados dois cenários futuros de uso e ocupação da terra referentes ao ano de 2055 novamente com o uso do *LCM*. Sendo o de número 1 aquele que apresenta a transição de áreas com vegetação do tipo caatinga para pastagem e agricultura e o de número 2 apresentando a transição de áreas ocupadas com a primeira e com a do tipo floresta para a terceira (Figura 21).

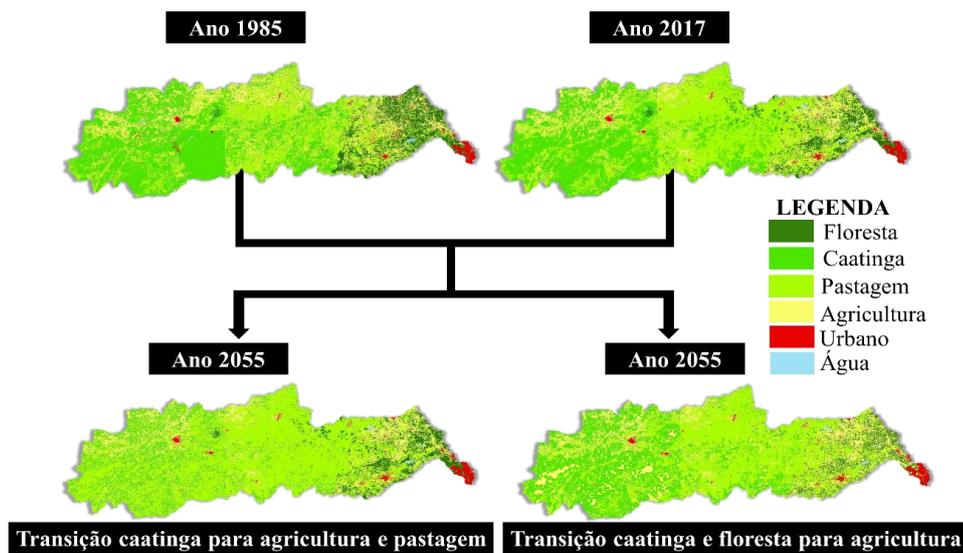


Figura 21. Cenários atuais e futuros LULC para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe

Percebe-se que houve variação significativa em relação à área ocupada por vegetação do tipo caatinga. No cenário referente ao ano de 1985, cerca de 41% da área da bacia hidrográfica apresentava esse tipo de cerrado, passando para cerca de 34% no ano de 2017. No panorama 1, 19% da área mais uma vez a referida vegetação a ocupa, assim como no cenário 2 a qual povoa em 29% da região (Figura 22).

A área ocupada por floresta também apresentou bastante variação ao longo do tempo. No ano de 1985, essa vegetação povoava cerca de 9% da região da bacia hidrográfica, passando para 6% no ano de 2017. No cenário 2 de uso e ocupação da terra, a mesma classe passou para 4%, já no panorama 1 se manteve na faixa anterior. A maior evolução de área ocupada ocorre em relação à classe pastagem, que no ano de 1985 povoava 24% da área da bacia, passando para 40% no ano de 2017.

Essa observação também foi um dos critérios utilizados para o desenvolvimento dos cenários futuros com transição de caatinga e floresta para pastagem ou agricultura, uma vez que

há indícios de ser essa a tendência de evolução do uso e ocupação da terra para a área em questão.

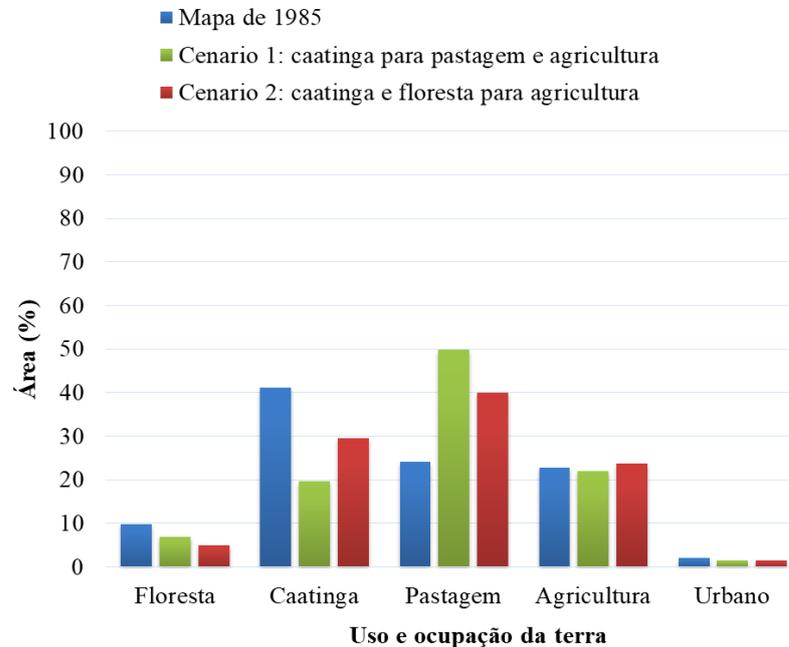


Figura 22. Uso e ocupação da terra nos cenários atual e futuros

Tal resultado mostra que o *LCM*, de acordo com o critério de região aproximada, e, ainda, com potencial de transição entre os cenários de uso e ocupação da terra do ano 1985 e 2017, apresenta maior probabilidade de ocorrer a transformação da classe com vegetação caatinga e floresta para pastagem, do que a transformação de áreas ocupadas pela primeira em agricultura, uma vez que não houve muita alteração em termos de percentual de área ocupada por esta última nos cenários futuros.

Para validar o resultado obtido com o *LCM* na geração de cenários futuros, optou-se por selecionar um mapa de *LULC* do projeto Mapbiomas de ano intermediário entre o período de 1985 e 2017, sendo o escolhido o referente ao ano de 2000.

Após uma breve análise, percebeu-se que a principal diferença entre o mapa de uso e cobertura da terra do ano 2000 e 2017 se encontra no percentual de área ocupada por formação florestal e pastagem, ou seja, o ano de 2017 apresentou maior região povoada pela primeira e menor percentual de área ocupada pela segunda. Nesse sentido, foi solicitado ao *LCM* a transformação de pastagem para formação florestal, visando realizar a previsão para cenário deste último ano mencionado.

O resultado referente à validação do *LCM* para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe pode ser visto na Figura 23, em que de fato o modelo realizou a transição das classes solicitadas. A resposta apresentou índice Kappa de 0,82, classificado como excelente, segundo Landis e Koch (1977).

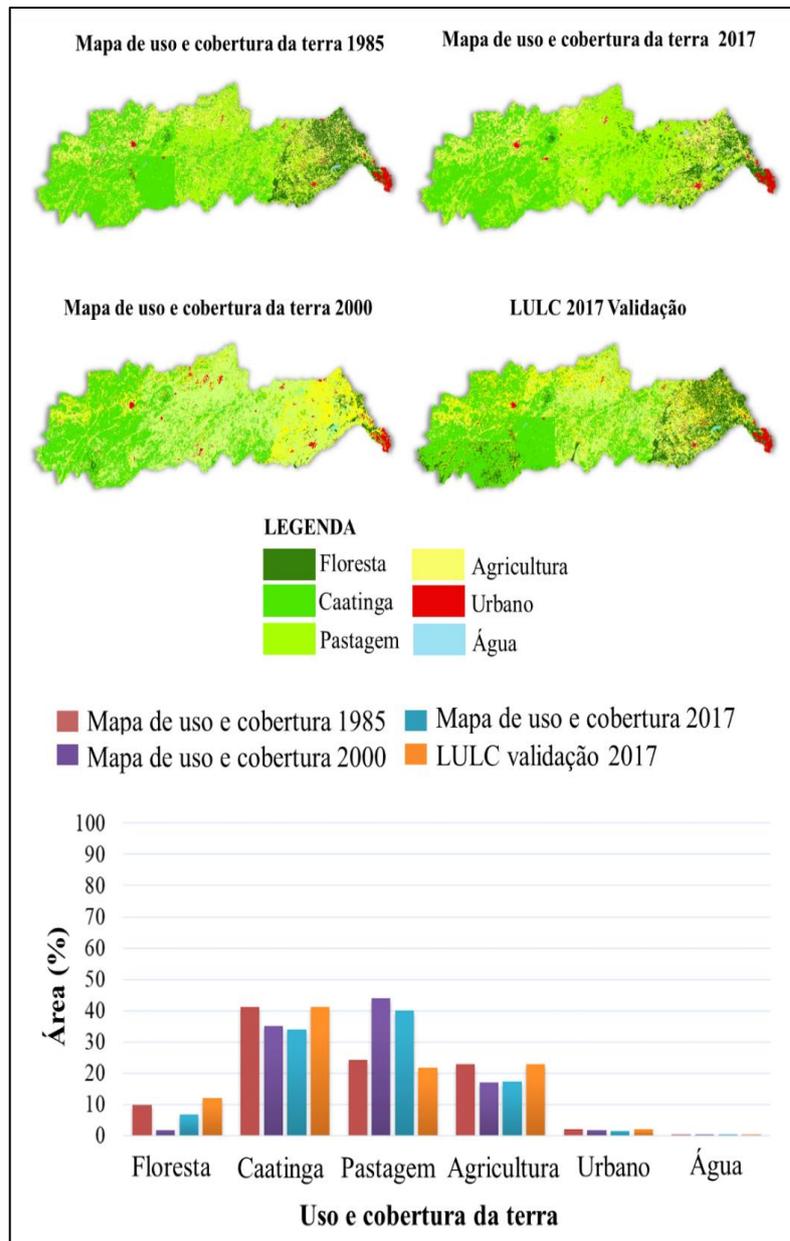


Figura 23. Validação do *LCM* em relação a cenários de uso e ocupação da terra nos cenários atuais de futuros

Percebe-se que o *LCM* segue satisfatoriamente aos comandos, porém é preciso relatar que o modelo tem certas limitações, como, por exemplo, o limite das potências de transições de

classes que consegue realizar simultaneamente, sendo o tamanho dessa demarcação de sete transições, que também é chamado de sete submodelos, o qual nada mais é que a passagem de uma classe para outra, como a mudança da categoria caatinga para pastagem.

A partir do momento em que a transição da classe caatinga e pastagem foi definida, todos os seis outros submodelos terão de possuir o mesmo nome. Mas, apesar dessa sua generalização de títulos, o *LCM* consegue funcionar e, também, não mistura as categorias, ou seja, o resultado final continua apresentando as classes de entradas com alterações do tamanho da área ocupada.

Mas em certos momentos, foi possível perceber que, ao tentar simular sete transições de classes simultaneamente, o *LCM* tendeu a calculá-las fora do limite da bacia. Nesse sentido, é preciso ter um olhar mais atento ao utilizá-lo no momento de definir as suas potenciais alterações de categorias de cenários *LULC* os quais se objetiva analisar.

### 6.2.3. Simulação hidrológica dos cenários *LULC*

Com o objetivo de avaliar a influência da evolução dos cenários *LULC* com o *MGB-IPH* sobre o regime de vazão na área da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, foi realizada a modelagem do clima atual associado aos panoramas futuros, mencionados no início deste parágrafo, desenvolvidos pelo modelo *LCM*, e ao mapa de *LULC* referente ao ano de 1985. Desse modo, foi possível perceber uma mais notável ocorrência de tal fenômeno no cenário que apresenta maior área com vegetação de grande porte (floresta e caatinga), sendo este o referido quadro também aqui citado, como pode ser visto na Figura 24.

Esse resultado diverge do que relata a literatura sobre o tema em questão, uma vez que áreas ocupadas por vegetação do tipo pastagem tendem a gerar maior escoamento e vazão quando comparado a áreas ocupadas pela arbórea. Os parâmetros calibráveis do modelo estão no anexo IV. Aqui é válido ressaltar que isso será analisado com mais detalhes na seção de discussão dos resultados.

Percebe-se, também, que o cenário 2 - transição de caatinga e floresta para agricultura-foi o que apresentou menores volumes de vazão no período de cheia (Figura 25). Em todas as estações fluviométricas, os panoramas 1 e 2 apresentaram-nos durante os meses de fevereiro a maio, percebendo, neste fenômeno, pouca alteração entre o período de junho a dezembro.

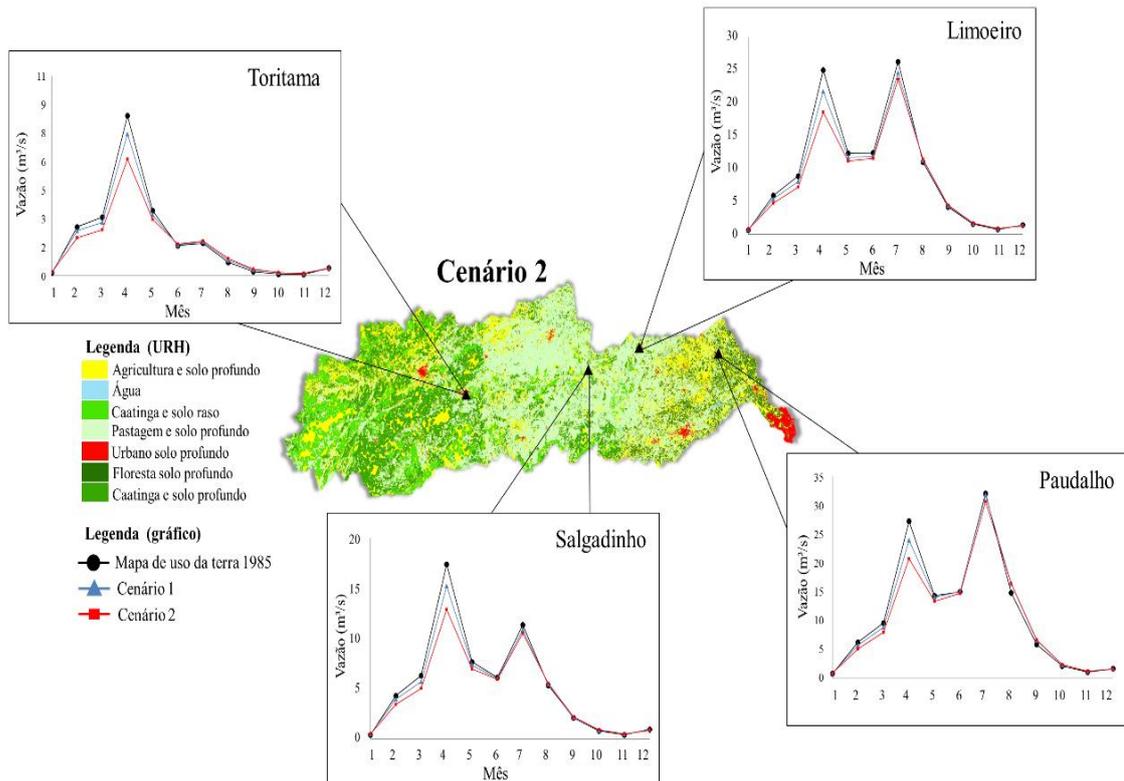


Figura 24. Vazão média de longo prazo nas estações fluviométricas utilizadas na calibração da bacia hidrográfica do rio Capibaribe referente aos cenários *LULC* e o climático atual

Pode-se perceber, também, que nos cenários *LULC* 1 e 2, os volumes de vazão apresentam alterações negativas na bacia hidrográfica como um todo, ou seja, a comparação das curvas de cada panorama mencionado apresenta comportamento semelhante em todas as estações. A Figura 29 expõe a evapotranspiração média real, a umidade média do solo e o escoamento superficial de longo prazo para cada cenário de uso e ocupação da terra, que foi simulado pelo modelo *MGB-IPH*, considerando o clima para o período de calibração.

Em relação à umidade do solo (Figura 30c), percebe-se que os cenários 1 e 2 apresentaram seu maior teor nos meses de julho a outubro em comparação à simulação hidrológica com o mapa de 1985. Por outro lado, observam-se maiores valores de evapotranspiração na representação com o referido quadro (Figura 30b) no período de março a julho, e menores de setembro a dezembro, sendo possível notar que a vazão no exutório da bacia foi maior no segundo panorama (Figura 30a).

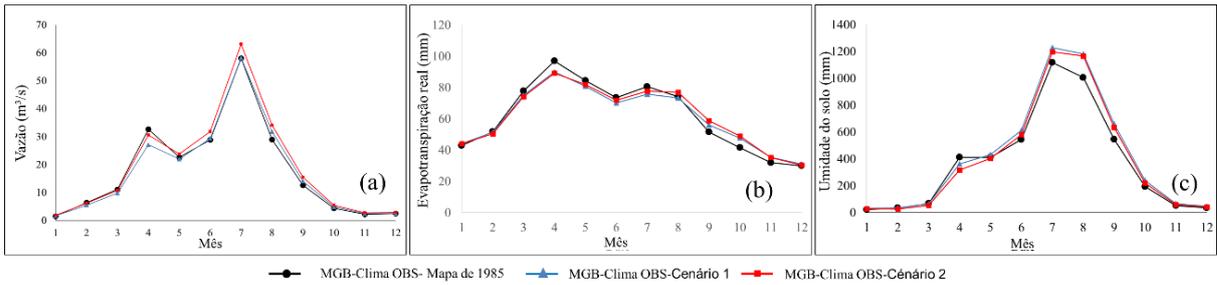


Figura 25. Valores médios de longo prazo no exutório da bacia para vazão (a); evaporação real (b); umidade do solo (c) referente aos cenários *LULC* e clima observado (1973-1982).

#### 6.2.4. Modelagem hidrológica dos cenários futuros de clima e ocupação da terra comparados ao período baseline

Em relação aos volumes de precipitação pluviométrica, em geral, o que se observa é que o cenário *Eta-BESM* futuro os apresenta (Figura 26) maiores que o *Eta-BESM baseline*, o que, em tese, tende a ocasionar volumes mais elevados de vazão. Já o *Eta-CANESM* quanto *Eta-MIROC* indicam sua redução nos cenários futuros de clima.

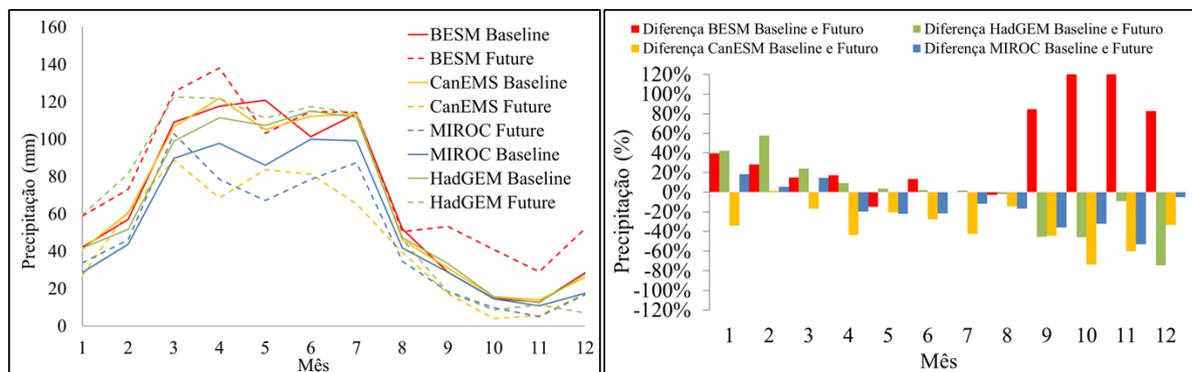


Figura 26. Precipitação média de longo prazo nos cenários climáticos futuros e baseline

Além disso, existe significativa diferença nos volumes precipitados entre *Eta-BESM Futuro* e *Eta-BESM Baseline*. No entanto, percebe-se que na modelagem dos respectivos cenários, essas rodadas junto com o mapa de 1985 foram as que apresentaram condições mais severas de diminuição de vazão (Figura 27a).

O *Eta-HADGEM* apresenta volumes mais elevados de precipitação pluviométrica no período futuro (Figura 26) com valores mais próximos ao *Eta-BESM*, principalmente na época chuvosa, com seu menor volume no período *baseline* para ambos os modelos climáticos. Porém, mesmo assim, as curvas de vazão da rodada *MGB-Eta-HADGEM* apresentaram diferenças menos abruptas entre si.

Os valores da precipitação no *Eta-CANESM baseline* foram os mais elevados em comparação com *Eta-CANESM Futuro* (Figura 26). Nesse sentido, é possível perceber, em decorrência da sua elevação, maiores picos de vazão na rodada *MGB-Eta-CANESM baseline* + Mapa de 1985 (Figura 27d).

A modelagem dos cenários futuros de clima associado às situações futuras de uso e ocupação da terra com o *MGB-IPH* para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe mostrou que há alterações positivas e negativas na vazão em relação as diversas combinações desses panoramas, apresentando a rodada do modelo *MGB-Eta-BESM Futuro* + mapa de 1985 seus maiores valores em comparação às outras combinações (Figura 27a). Sendo, também, possível observar o mesmo comportamento na rodada *MGB-Eta-HADGEM* (Figura 27b).

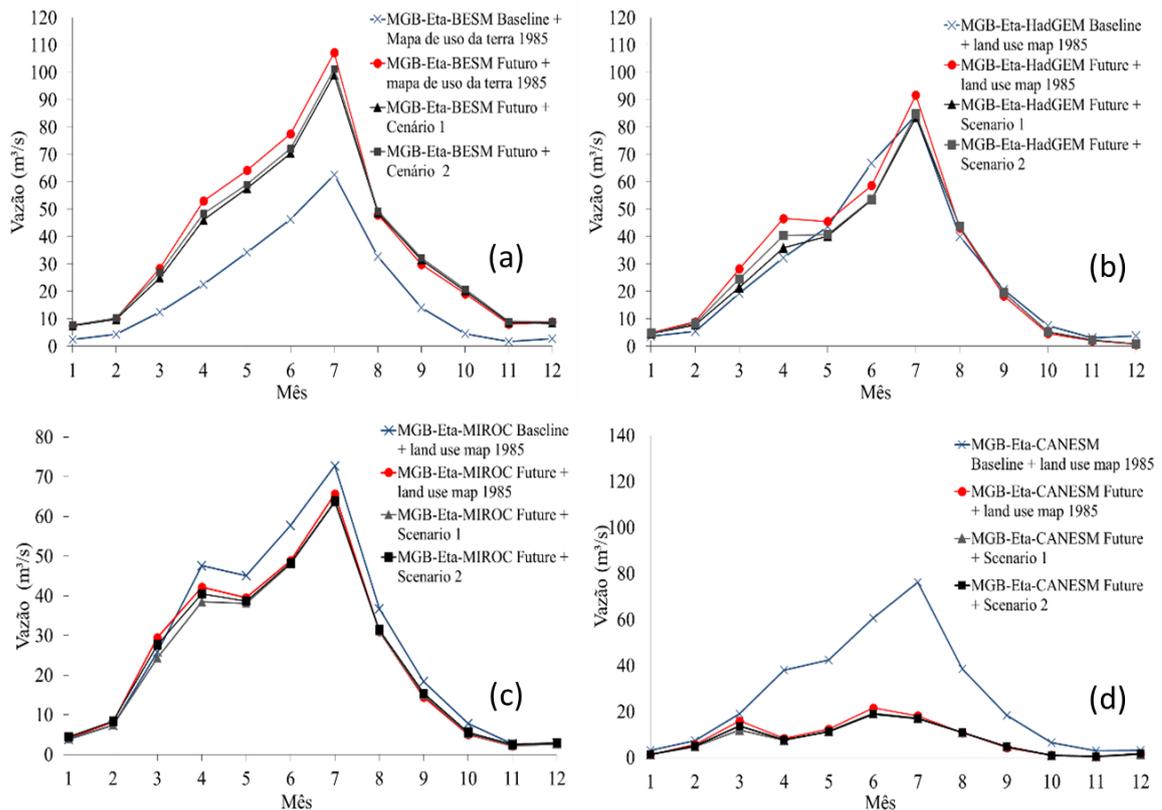


Figura 27. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia referente ao cenário de uso e ocupação da terra e cenários climáticos *MGB-Eta-BESM* (a), *MGB-Eta-HADGEM* (b), *MGB-Eta-MIROC* (c) *MGB-Eta-CANESM* (d)

Porém, na rodada do *MGB-Eta-HADGEM*, o comportamento das curvas foram mais ou menos semelhantes, sem muita variação abrupta negativa ou positiva na vazão, a qual se

comporta diferente na sessão do *MGB-Eta-BESM*, apresentando uma elevação acentuada nas rodadas combinadas com os cenários futuros de clima em comparação com a do modelo com o clima baseline (Figura 27a). Isso ocorre em função do maior volume precipitado, da menor temperatura e menor teor de umidade no panorama *Eta-BESM* no período futuro em comparação ao período baseline.

Nesse sentido, houve um aumento de 31 m<sup>3</sup>/s na vazão do mês de junho na rodada do modelo que combina o mapa de 1985 de uso da terra e clima futuro em comparação à sessão *MGB-Eta-Baseline* junto com o quadro supramencionado. Em julho, a diferença foi superior a 45 m<sup>3</sup>/s.

Para o resultado do *MGB-Eta-HADGEM*, em relação às rodadas dos modelos citados anteriormente, existe uma diminuição na vazão de 12% no mês de junho e uma elevação de 8% no mês seguinte, em comparação com essa última rodada + Mapa de 1985.

A simulação hidrológica com a rodada *MGB-Eta-CANESM* e *MGB-Eta-MIROC* apresentaram maiores volumes de vazão nos cenários climáticos no período baseline quando associado ao Mapa *LULC* de 1985 (Figura 27 c e d). Na referida segunda sessão, percebe-se que a diminuição de vazão não foi tão acentuada quando comparada à primeira rodada, na qual foi possível perceber sua notável subtração nos dois cenários futuros de clima (Figura 37 c e d).

Esse fato ocorre em função da diminuição do volume precipitado nos cenários futuros de clima com o *Eta-CANESM* somado à elevação média de 3°C da temperatura e subtração de cerca de 1% no teor da umidade climática. Esses fatores somados aos cenários *LULC* futuros e parametrização do modelo *MGB-IPH* para a bacia do rio Capibaribe acarretam na diminuição da vazão.

A Tabela 7 apresenta os valores máximos, mínimos e médios das diversas rodadas do modelo. Percebe-se que houve elevação na vazão máxima na sessão *MGB-Eta-BESM* futuro + mapa 1985 e, também, que sua menor ocorrência foi maior com o clima futuro + cenário 2 de uso e ocupação da terra para essa presente rodada.

Comportamento semelhante foi encontrado na rodada do modelo *MGB-Eta-HADGEM*, que apresentou vazões máximas mais elevadas com o clima futuro associado ao mapa de 1985, enquanto as mínimas foram inferiores em comparação a essa referida sessão (Tabela 7).

Tabela 7. Vazões máximas, mínimas e médias nos cenários *LULC* e climáticos

MGB-Eta-BESM				
Vazão	Baseline + Mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo (m/s <sup>3</sup> )	62,66	107,19	99,12	101,27
Mínimo (m/s <sup>3</sup> )	1,78	7,67	7,45	7,87
Média (m/s <sup>3</sup> )	20,15	38,56	36,11	37,25
MGB-Eta-MIROC				
Vazão	Baseline + Mapa 1985	Futuro + Cenário 85	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo (m/s <sup>3</sup> )	72,73	65,64	63,59	63,94
Mínimo (m/s <sup>3</sup> )	2,72	2,17	2,28	2,56
Média (m/s <sup>3</sup> )	27,39	24,46	23,35	24,18
MGB-Eta-CANESM				
Vazão	Baseline + Mapa 1985	Futuro + Cenário 85	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo (m/s <sup>3</sup> )	76,21	21,65	19,30	18,98
Mínimo (m/s <sup>3</sup> )	2,93	0,44	0,56	0,55
Média (m/s <sup>3</sup> )	26,38	8,49	7,69	7,87
MGB-Eta- HADGEM				
Vazão	Baseline + Mapa 1985	Futuro + Cenário 85	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
Máximo (m/s <sup>3</sup> )	84,22	91,69	83,64	84,64
Mínimo (m/s <sup>3</sup> )	3,08	0,76	0,89	0,89
Média (m/s <sup>3</sup> )	27,60	29,52	26,60	26,60

As rodadas *MGB-Eta-MIROC* e *MGB-Eta-CANESM* com clima futuro, independentemente do cenário de uso e ocupação da terra associado, apresentam valores menores de vazões máximas, mínimas e médias em comparação com o período baseline dos respectivos modelos.

A Tabela 8 apresenta os valores da vazão  $Q_{10}$  e  $Q_{90}$  a nível mensal para a simulação hidrológica nos cenários de uso e ocupação da terra atual e futuros associados aos cenários de clima também nos mesmos tempos.

Percebe-se que o resultado do modelo *MGB-IPH* com os cenários de uso da terra e clima atuais e futuros indica elevação na vazão de cheia  $Q_{10}$  na rodada *MGB-Eta-MIROC*, enquanto a de estiagem ( $Q_{90}$ ) apresenta uma pequena diminuição, tanto no cenário 1 quanto no 2 de uso e ocupação do solo.

Tabela 8. Vazões  $Q_{10}$  e  $Q_{90}$  a nível mensal nos cenários *LULC* e climáticos

MGB-Eta-BESM				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	53,75	91,29	83,00	84,40
$Q_{90}$	0,71	4,79	5,09	5,31
MGB-Eta-MIROC				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	63,63	58,92	55,38	56,07
$Q_{90}$	2,22	1,91	1,96	2,26
MGB-Eta-CANESM				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	68,86	21,60	19,64	20,28
$Q_{90}$	1,29	0,22	0,33	0,32
MGB-Eta-HADGEM				
Vazão	Baseline + mapa 1985	Futuro + mapa 1985	Futuro + Cenário 1	Futuro + Cenário 2
$Q_{10}$	81,30	88,92	80,04	81,68
$Q_{90}$	1,24	0,81	0,94	0,93

Nesse sentido, na modelagem do cenário de clima futuro *MGB-Eta-MIROC* associada ao mapa de uso do solo de 1985, houve um aumento no  $Q_{10}$  de 246,38% em relação ao cenário de baseline relacionado ao quadro supramencionado, e de 374% no panorama climático futuro ligado ao de número 2.

Em relação aos resultados do *MGB-Eta-BESM*, observa-se uma elevação na  $Q_{10}$  em 49% na rodada que associa cenário de clima futuro ao mapa de 1985 em comparação à modelagem da amostra climática baseline + o referido quadro supramencionado. Percebe-se, também, um aumento de 125 % na vazão  $Q_{10}$  no panorama climático futuro associado ao mapa de 1985 em comparação ao segundo cenário. Nas outras combinações do *MGB-Eta-BESM*, foi possível observar uma maior ocorrência do referido fenômeno.

O *MGB-Eta-CANESM* apresentou volumes menores tanto na  $Q_{10}$  quanto na  $Q_{90}$  nas simulações do *MGB-IPH* com os cenários futuros de clima e uso da terra futuros. Em contrapartida, houve um pequeno aumento na segunda para a modelagem de *MGB-Eta-*

*HADGEM* futuro associado ao mapa de 1985 em comparação à rodada *MBG-Eta-HADGEM* combinado com o mapa de 1985.

A figura 28 apresenta a comparação da vazão calculada no período baseline dos modelos climáticos com sua versão utilizando dados do clima observados, que se remetem ao mesmo período (1973 a 1990) em função da sua disponibilidade para esta pesquisa e considerando a URH referente ao mapa de 1985.

Ainda na figura 28, é possível observar que os cenários climáticos representaram satisfatoriamente a sazonalidade da vazão ao longo do tempo (Figura 28 a), porém, apresentando suas divergências e com sua maior umidade no período *baseline* dos cenários climáticos de maio a outubro.

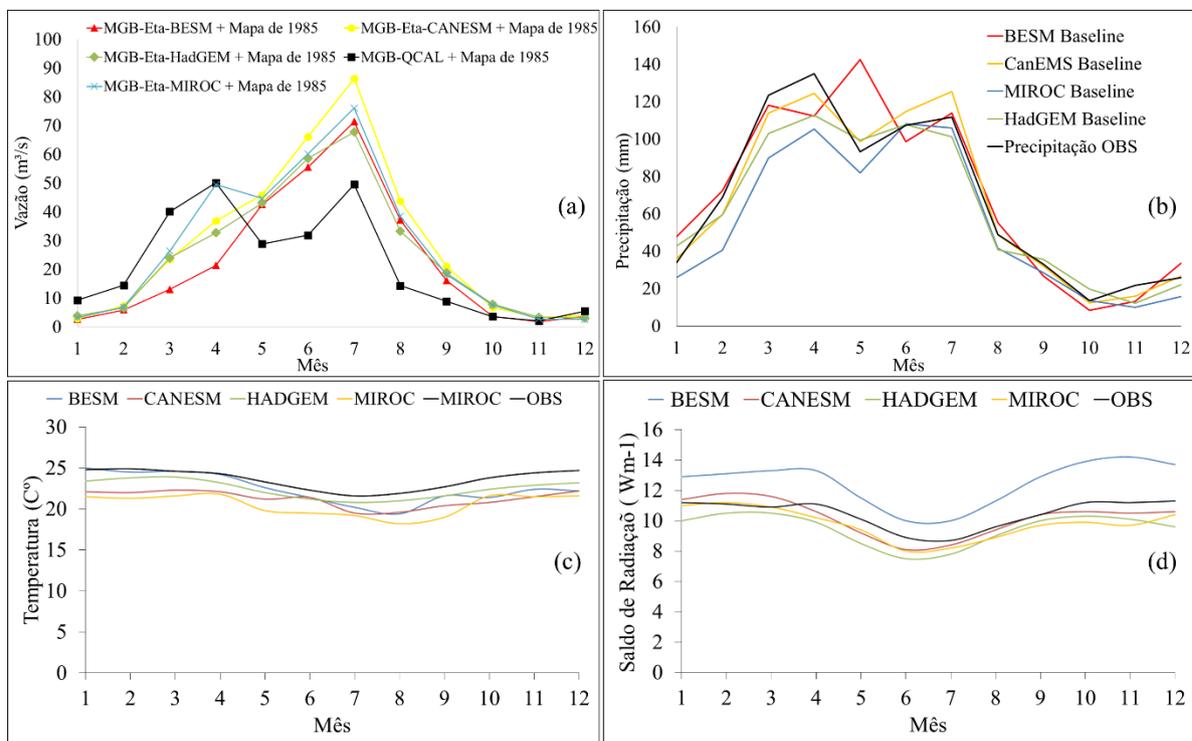


Figura 28: Vazão calculada com dados dos modelos climáticos no período baseline e dados observados (1973-1990) (a); Precipitação dos cenários climáticos no período baseline e observado (b); Temperatura dos cenários climáticos no período baseline e observado (c); Saldo de radiação dos cenários climáticos no período baseline e observado (d)

A diferença da vazão entre os cenários climáticos ocorre em função das divergências nas normais climatológicas. As variáveis precipitações, a temperatura e o saldo de radiação são as mais sensíveis do modelo *MGB-IPH*. É possível perceber que em relação às primeiras, existe significativa diferença entre os panoramas do clima no período baseline em comparação com a

precipitação observada na mesma época (1973 – 1990) (Figura 18 b). Tanto o segundo fenômeno, quanto o terceiro apresentaram maiores divergências entre os modelos climáticos e os dados observados. Esse é o motivo dos valores diferentes na vazão calculada no período mencionado.

## 7. DISCUSSÃO

### 7.1. AJUSTE DO MODELO MGB-IPH

Os valores das estatísticas do modelo na simulação hidrológica para a bacia hidrográfica do rio Pajeú e Capibaribe foram semelhantes aos encontrados por Felix e Paz (2016) para a do rio Piancó – PB com a utilização da amostra *MGB-IPH*, assim como Beserra (2016) que também encontrou estatísticas análogas ao utilizá-lo enquanto fizera a mesma representação para a bacia do rio Grande, afluente do Rio São Francisco, no oeste Baiano. Assim como Silva e Medeiros (2018) para o rio Piranhas-Açu e Andrade Neto (2022) para a sub-bacia do rio Banabuiú, localizada no estado do Ceará.

No entanto, é importante frisar que outros estudos os quais buscaram aplicar o modelo *MGB-IPH* para bacias hidrográficas de clima semiárido apresentaram estatísticas mais baixas, como por exemplo, Negueiros (2017) que realizou a modelagem da do rio Seridó e obteve NS variando de -1,025 a 0,246. Segundo o autor, o motivo seria devido aos diversos reservatórios de regularização de vazão na bacia, os quais o modelo não os considera.

Ainda nesse sentido, Araujo (2017) obteve NS variando de 0,024 a 0,481 para a bacia de rio intermitente Apodi-Mossoró. Valores esses semelhantes aos apresentados na validação do modelo *MGB-IPH* para a do rio Capibaribe nas estações fluviométrica de Paudalho, Limoeiro e Salgadinho, já apresentados nesta presente pesquisa. No entanto, vale salientar que não existe influência de reservatórios no período selecionado para calibração e validação da bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

Em comparação com outras amostras hidrológicas, Escarião *et al.* (2012) obtiveram NS de 0,63 com o modelo estatístico *SFMODEL*, 0,89 com o chuva-vazão concentrado GRH, 0,83 com o distribuído *MIKE SHE* e 0,78 com Redes Neurais Artificiais para a bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB, a qual apresenta características fisiográficas semelhantes às da presente pesquisa.

Assim como Ribeiro Neto *et al.* (2014) realizaram a simulação hidrológica da bacia do rio Capibaribe com modelo *MODHAC* e encontraram coeficiente de NS variando entre 0,52 e 0,83. Desse modo, percebe-se que as estatísticas dessa amostra estão semelhantes a outras aplicações, tanto do próprio *MGB-IPH*, quanto a outras representações hidrológicas. Além disso, percebe-se que seu ajuste foi satisfatório em termos de hidrograma, representando a sazonalidade das bacias hidrográficas e os momentos de subidas e decida das vazões.

## 7.2. MODELAGEM HIDROLÓGICA DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO

Ambas as bacias hidrográficas foram calibradas com um único conjunto de parâmetros, apesar de cada uma delas apresentarem o seu individual, visando não permitir que o modelo encontre seus diferentes valores para uma mesma classe da URH. Além disso, o critério adotado para defini-los em seu tipo  $Wm$  foi o reconhecimento de que a vegetação de maior porte tende a se desenvolver melhor em solos com maiores profundidades (MENEZES, 2016; SILVA *et al.*, 2015; GALINDO *et al.*, 2008; RUGGIERO *et al.*, 2006). Essa escolha foi assim realizada em função das bacias apresentarem essas classes de terra na URH de mesma profundidade.

Nesse sentido, os valores maiores de  $Wm$  foram definidos para classes com vegetação caatinga, e outras da URH, como pastagem e agricultura, ficaram com os menores. Esse critério também levou em consideração a forma como o modelo *MGB-IPH* gera escoamento superficial, que é a partir do momento em que o solo atinge sua capacidade máxima de armazenamento de água.

Além disso, entende-se que solos com maiores profundidades apresentam maior potencial de infiltração ou absorção de água. Nesse contexto, de acordo com a literatura, superfícies com presença de vegetação florestal apresentam maior capacidade infiltrativa que solo com pastagem (LORENZO, 2011; TUCCI; CLARKE, 1997).

Em geral, os valores baixos do parâmetro  $Wm$  foram adotados com o objetivo de melhor representar os picos máximos de vazão. O padrão  $b$ , que controla o processo de infiltração de água no solo, apresenta maior influência no referido fenômeno em seus baixos e picos médios.

Nesse contexto, foi possível perceber que valores maiores do parâmetro  $b$  acarretava diminuição da suavidade das curvas do hidrograma, deixando o modelo, como assim relata Collischonn (2001), com uma aparência mais nervosa. Por tal motivo, para a presente pesquisa, o melhor conjunto de paradigmas para calibração da amostra não considerou valores mais elevados para o parâmetro  $b$ , tanto para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú, quanto para a do rio Capibaribe.

Contudo, mesmo com valores baixos de  $Wm$ , o modelo não conseguiu representar os picos máximos de vazão no período de validação na Estação de Floresta na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú. Porém, é possível perceber que essa amostra entregou satisfatoriamente os momentos de estiagens, tanto para a de Flores, quanto para a de Floresta.

Mesmo com os critérios para a definição do parâmetro  $Wm$ , percebeu-se que nem sempre será possível segui-los. Ou seja, às vezes, por necessidade do modelo e na presente

pesquisa, foi preciso atribuir valores mais elevados para classe da *URH* com pastagem e agricultura na bacia hidrográfica do rio Capibaribe em comparação com classes caatinga.

Esse fato ocorre em função da maior área ocupada por pastagem e agricultura. Nesse sentido, foi possível perceber que as tentativas de atribuir valores mais baixos de *Wm* para ambas as classes acabavam acarretando na superestimação dos picos máximos de vazão. Desse modo, pode-se afirmar que por necessidade do modelo em relação ao seu ajuste, torna-se necessário definir valores mais baixos de *Wm* para solos profundos com presença de vegetação de grande porte e quantias mais elevadas para superfícies rasas que apresentam o cerrado e a pastagem.

No entanto, vale salientar que o critério adotado combinou bem na modelagem da bacia do rio Pajeú. Possivelmente, para a hidrográfica do rio Capibaribe fosse necessário definir uma *URH* com mais subdivisões dos tipos de solos de modo a gerá-la com uma maior quantidade de classes, o que poderia diminuir o seu tamanho. Porém, essa divergência de resultados serviu para mostrar a influência do modelo ao considerá-lo para simulação de cenários *LULC*.

Nesse sentido, na bacia hidrográfica do rio Pajeú, foi possível perceber que a vazão foi maior no cenário com menor área florestal. Esse fato ocorre devido à substituição da vegetação caatinga por pastagem e agricultura.

Como na presente pesquisa o parâmetro de capacidade de armazenamento de água no solo (*Wm*) foi definido com valores maiores para vegetação caatinga e menores para áreas ocupadas por pastagem e agricultura para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Pajeú, ao ocorrer a transição de um tipo de cerrado para outro, há, conseqüentemente, a substituição do parâmetro *Wm* atribuído ao modelo *MGB-IPH*. Desse modo, a *URH* com menor valor daquele padrão atinge mais rapidamente a capacidade de armazenamento de água e, por conseqüência, passa a gerar maior escoamento superficial, atingindo mais rapidamente a calha do rio, o que acaba elevando a vazão.

De acordo com a lógica do modelo, sempre que a *URH* atingir sua capacidade máxima de armazenamento, o modelo gera escoamento superficial. Embora não seja o *Wm* o parâmetro da amostra que controla o processo de infiltração de água do solo, resultou que tal padrão acabou proporcionando uma interpretação semelhante ao que relata a literatura em relação a volumes de escoamento em diversos tipos de coberturas vegetais, uma vez que o paradigma *b*, que controla o processo de infiltração na superfície, foi semelhante para todas as *URHs* na bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Assim, para a sua simulação hidrológica, a permuta da vegetação caatinga por pastagem e agricultura acarreta na elevação da vazão, o que está de acordo com o que relata outros estudos relacionados (LI *et al.*, 2012; VANZELA *et al.*, 2009; GÊNOVA *et al.*, 2007), ao tempo que ocasiona sua diminuição na bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

O resultado obtido para essa respectiva bacia coincide com o encontrado por Sirqueira *et al.* (2022) para a do rio Sapucaí (MG) com o modelo *MGB-IPH*. Os autores verificaram aumento das vazões que coincide com o da cobertura florestal, embora esses pesquisadores não tenham apresentado o conjunto de parâmetros da amostra. No entanto, mencionaram que os definiram de acordo com Felix e Paz (2016) com aplicação do modelo para a bacia hidrográfica do rio Piancó – PB. Essa respectiva pesquisa também foi utilizada como referência para definição dos valores de  $W_m$  para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Pajeú e Capibaribe.

Nota-se, no presente estudo, a influência da parametrização do modelo na diminuição ou elevação da vazão para diferentes cenários *LULC*. Para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, a definição dos paradigmas que melhor representou o regime do mencionado fenômeno considerou valores mais elevados de  $W_m$  - parâmetro que controla a capacidade de armazenamento de água no solo - para as classes pastagem e agricultura.

Embora as duas classes apresentem maiores dificuldades de infiltração de água no solo, que é definido pelo parâmetro  $b$  do modelo, percebe-se que o padrão  $W_m$  é o que apresenta maior influência sobre a vazão, uma vez que a amostra gera escoamento superficial a partir do momento em que a superfície atinge a sua capacidade máxima de armazenamento de água, atingindo mais rapidamente a calha do rio esse segundo fenômeno. Mesmo que a infiltração ocorra com maior dificuldade na classe pastagem e agricultura, o modelo passa a gerar mais escoamento superficial quando o solo atinge o seu limite extremo de acondicionamento de água.

No entanto, quanto à simulação de diferentes cenários *LULC*, a literatura é bastante divergente com respeito às alterações negativas ou positivas da vazão. Por exemplo, Jati (2017) relatou que não encontrou alterações significativas na bacia hidrográfica do rio Curuá-Una, localizado a sudeste de Santarém/Pará com o modelo *MGB-IPH*.

Por outro lado, Brito Neto *et al.* (2021), também com a utilização da amostra supracitada, verificaram maiores valores de vazões mensais médias, totais, máximas e mínimas no Rio Pardo no ano de 2016. No estudo, os autores constataram que houve redução da área ocupada por floresta ao tempo que existiu um aumento das áreas com atividades agropecuárias no período de 2001 a 2016.

Vale ressaltar que, nesse estudo, os autores também utilizaram dados de uso e ocupação da terra provindos do MapBiomas. Porém, não foram mostrados os valores dos parâmetros calibráveis do modelo no artigo, mas em sua dissertação (BRITO, 2018) é possível perceber a atenção demandada no momento de definir os parâmetros da amostra atribuindo valores maiores de  $Wm$  a solos de muita profundidade e  $Wm$  menor ao de pouca profundidade. Existe também uma correlação, talvez não proposital, de associar o tipo de vegetação à definição do referido parâmetro. No entanto, observa-se que nesse caso funcionou.

Porém esse método de atribuição de valores de  $Wm$  de acordo com o tipo de vegetação seja mais indicado para *URHs* que apresentam, em grande maioria, solos de maiores profundidades para que o modelo possa apresentar resultados próximos ao que relata a literatura em questão.

Ainda nesse contexto, Cocconi (2019) também com a utilização do modelo *MGB-IPH* para simulação da bacia hidrográfica Taquari-Antas, constatou que não há grande variação nos valores de vazão média de longo prazo em diferentes cenários *LULC*, e que em panoramas de maior cobertura vegetal, observam-se decréscimos no escoamento superficial e no primeiro fenômeno mencionado. Porém, nesse estudo foi possível analisar os parâmetros calibráveis do modelo e foi observado que, para a área com cobertura vegetal natural, foi atribuído maior valor para o parâmetro  $Wm$ .

Desse modo, coincidindo com a suspeita da presente pesquisa - a influência da parametrização do modelo - sendo necessário atentar-se demasiadamente na definição de tais paradigmas para ter maior propriedade no momento de avaliar ou confirmar se existe alteração positiva ou negativa em relação aos processos hidrológicos correlacionados a diferentes cenários *LULC*.

Por outro lado, Blainski *et al.* (2017) relatam que essa divergência de resultados sugere que a variabilidade intrínseca das características da bacia hidrográfica poderia definir o grau de dependência em relação ao uso e ocupação da terra, ou seja, isso pode variar de uma bacia para outra. Vale salientar que tal versatilidade também existe com a utilização de outros modelos hidrológicos. Porém, o modelo *SWAT* tem apresentado, ao menos nas pesquisas encontradas, resultados mais semelhantes entre si.

Nesse contexto, também foi perceber que o grau de evolução do uso e ocupação da terra também pode interferir na parametrização do modelo, não sendo possível atribuir o critério de maior valor de  $Wm$  para vegetação de grande porte, uma vez que quanto maior for a área

ocupada por uma classe de emprego e povoamento do solo mais essa categoria apresentará sensibilidade para o modelo *MGB-IPH*.

Nesse sentido, qualquer alteração do parâmetro  $W_m$  apresenta resposta significativa na calibração do modelo e, conseqüentemente, na elevação ou diminuição da vazão. Foi o caso da aplicação da amostra *MGB-IPH* para a bacia do rio Capibaribe, que, por necessidade do modelo, sempre solicitava valores maiores do padrão supramencionado para pastagem e agricultura.

Em relação aos processos hidrológicos, a umidade do solo foi maior no cenário 1 e 2 para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Para a do rio Pajeú, observa-se que na primeira situação, parte do período chuvoso da bacia apresentou menor teor de umidade do solo, mas apresentando maior de umidade no período de estiagem. Enquanto o cenário 2 apresentou curvas semelhantes à simulação com mapa *LULC* 1985.

Esse comportamento, para ambas as áreas em estudo, tem relação com o parâmetro  $W_m$ . Nos cenários que houve maior teor de umidade do solo, existiu também seu maior valor, ou seja, maior capacidade de armazenamento de água na superfície. Porém, para a bacia do rio Capibaribe, seus respectivos altos valores foram atribuídos para as classes pastagem e agricultura, ao tempo que no Pajeú, foram para a classe caatinga.

Comportamento inverso para evapotranspiração real ( $ET_r$ ) para as duas bacias hidrográficas que apresentaram maiores valores de  $ET_r$  na simulação com o mapa *LULC* de 1985. Dessa forma, existe aqui uma relação com os parâmetros fixos do modelo, como o índice de área foliar, por exemplo. Com a diminuição da área ocupada por vegetação caatinga, menor é a sua interceptação e, conseqüentemente, ocorrerá menor valor de  $ET_r$ .

Esse resultado é semelhante ao encontrado por Melo et al. (2021), que constataram existir relevância da cobertura vegetal caatinga para a manutenção dos processos biofísicos na superfície terrestre, em particular a  $ET_r$  que está associada à densidade da vegetação. Desse modo, áreas com maiores índices dessa matéria estão sujeitas a perder uma maior quantidade de água por esse processo.

Nesse contexto, além de ser necessário demandar maior atenção para a parametrização do modelo, torna-se necessário, também, aumentar a quantidade de classes da *URH* para diminuir o tamanho total das áreas ocupadas por pastagens e agricultura e assim subtrair a sua influência em relação à padronização da amostra, em particular para o parâmetro  $W_m$ . Uma alternativa seria trabalhar com mais classes de tipo de solo, o que poderia oferecer um maior controle desse paradigma.

Porém, é preciso considerar o grau de antropização da bacia hidrográfica em relação aos cenários *LULC*, o que pode estar diretamente ligado à divergência de resultados entre si. Percebe-se que aplicações do *MGB-IPH* a bacias com vegetação natural mais conservada (o caso de Pajeú/PE e Piancó/PB) apresentam resultados semelhantes, mas divergem de bacias hidrográficas com alto grau de desmatamento, como é o caso de Capibaribe/PE.

### 7.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS FUTUROS DE CLIMA E *LULC*

Em relação à simulação de ambas as bacias hidrográficas com dados oriundos dos modelos climáticos, foi possível perceber que em todos eles a sazonalidade foi representada de forma satisfatória. Esse é um comportamento que Vergasta *et al.* (2021) também encontraram ao utilizar da amostra regional climática *Eta/CEPTEC*. No entanto, observam-se diferenças significativas nos volumes de vazão de modelo para modelo e entre simulações hidrológicas com dados providos de uma mesma amostra climática (período baseline e futuro).

Nesse contexto, em termos de volumes de vazão média de longo prazo, seu maior pico na rodada *MGB-Eta-BESM* futuro + cenário *LULC 2* atingiu 112,31 m<sup>3</sup>/s ao tempo que na vez da *MGB-Eta-HADGEM* futuro + o panorama mencionado foi por si alcançado 133,70 m<sup>3</sup>/s, uma diferença de 21,39 m<sup>3</sup>/s entre os resultados das simulações hidrológicas com dados climáticos do *Eta-BESM* e *Eta-HADGEM* na bacia hidrográfica do Rio Pajeú. Já na sessão *MGB-Eta-MIROC* o maior pico de vazão foi de 114,73 m<sup>3</sup>/s no período baseline e na *MGB-Eta-CANESM* foi de 81,07 m<sup>3</sup>/s também na mesma época, diferença de 33,66 m<sup>3</sup>/s quanto ao referido fenômeno.

Essa variedade de resultados ocorre, principalmente, em função da diferença dos volumes precipitados entre os modelos. O *Eta-HADGEM* futuro apresenta maiores volumes de precipitação pluviométrica em comparação ao cenário baseline, sendo esse o motivo de maiores valores da vazão máxima, mínima e média para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú na rodada *MGB-Eta-HADGEM* futuro. O *Eta-BESM* apresenta quantidades semelhantes no período chuvoso, mas no de estiagem exibe altos volumes de precipitação no cenário futuro em comparação ao baseline.

Esse resultado é semelhante ao encontrado por Alemayehu *et al.* (2020) para a Etiópia, em que se constatou uma subida da precipitação. E ao encontrado por Diki *et al.* (2015) ao verificar que o modelo *HADGEM2-ES* projeta um clima mais chuvoso para a África do Sul e para a Nigéria.

Porém, essa resposta é divergente ao relatado por Chou *et al.* (2014) e Haylock *et al.* (2006) ao alegarem que a da amostra regional *Eta*, acoplado ao modelo anterior, apresentam tendências para condições mais úmidas no período de 1961 a 1990 - período baseline - em grande parte do continente Sul-americano, sendo possível perceber que tal amostra representou adequadamente a precipitação no período de 1961 a 1990, trazendo projeções de clima mais chuvoso até o período de 2070, tanto em Pajeú quanto em Capibaribe.

O modelo *Eta-HADGEM* é o que apresenta maiores volumes de precipitação na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. Dessa forma, ocorrem maiores volumes de vazão, principalmente no período inicial do ano, na rodada *MGB-Eta-HADGEM* futuro + Mapa de 1985 na do rio em estudo. De maneira geral, percebe-se que essa sessão não apresenta tanta diferença na vazão média de longo prazo na bacia do rio Capibaribe em relação ao período baseline e futuro, mesmo associado aos cenários *LULC*.

Nesse contexto, Pelinson (2017) analisou a sensibilidade do modelo *MGB-IPH* em relação à mudança da precipitação pluviométrica sobre o regime de vazão, constatando que a cada 1% de seu aumento em nível médio, ocorre um acréscimo de 1,72% no segundo fenômeno, também de forma mediana, da bacia hidrográfica do Rio Negro – RS.

Ainda nessa perspectiva, Jati e Silva (2017), ao também provarem a sensibilidade do modelo *MGB-IPH* quanto à alteração nos volumes de precipitação na bacia Caruá-Una, verificaram que a diminuição de 50% das chuvas reduziu a vazão entre 14% a 32% e o aumento de 50% de chuvas a aumentou em 218,6%, mostrando forte sensibilidade do modelo em relação a alterações positivas ou negativas no regime de precipitação pluviométrica.

Os autores supracitados também ainda testaram a sensibilidade desse modelo em relação ao aumento da temperatura média e verificaram que a sua elevação não mostrou respostas significativas no regime de vazão. Entretanto, quando somado ao aumento e/ou diminuição do regime de precipitação, funcionou como fator atenuante tanto para as cheias quanto para as secas.

A rodada *MGB-Eta-BESM* foi a que apresentou maiores volumes de vazão média de longo prazo considerando o clima futuro em comparação com o período baseline (1961-1990), seguida da *MGB-Eta-HADGEM*. Enquanto a sessão *MGB-Eta-CANESM* foi a que apresentou condições mais severas em relação à diminuição dos volumes de vazão. No geral, esse é o comportamento apresentado, também, em relação ao período mencionado de cada modelo climático. Por fim a rodada *MGB-Eta-MIROC* que apresenta uma menor vazão média de longo prazo, porém não tão acentuada como a sessão anterior mencionada.

Esse comportamento também foi encontrado por Costa *et al.* (2022) com a utilização do modelo *MGB-IPH* para a bacia do rio Doce ao empregar cenários climáticos, mas é divergente ao relatado por Brito *et al.* (2019) e Marengo (2004) ao alegarem que o cenário *BESM* apresenta tendência de clima mais seco na maior parte da América do Sul.

Quanto aos valores máximos, mínimos e médios de vazão, as condições foram mais severas para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, principalmente na rodada *MGB-Eta-MIROC* e *MGB-Eta-CANESM*. Para a do rio Pajeú, essa última é a que apresenta diminuição de forma mais acentuada da vazão, porém ainda sendo uma condição mais amena em comparação à bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Esse resultado vai de encontro ao que também relatam Brito *et al.* (2019) e Marengo (2004), que o *MICOR5* apresenta tendência de clima mais seco para América do Sul.

A rodada *MGB-Eta-HADGEM* é a que apresentou maior tendência de subida da vazão para a bacia hidrográfica do rio Pajeú. Resultado semelhante ao encontrado por Schuster *et al.* (2020) para a transfronteiriça da Laguna dos Patos ao utilizar dados do modelo *HADGEM*.

A associação dos dados futuros de clima aos cenários *LULC* mostram que esse fator pode ser mais impactante para o aumento da vazão do que tais panoramas para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, uma vez que geram menores volumes desse fenômeno, mas quando associado, principalmente aos cenários climáticos *Eta-BESM* e *Eta-HADGEM*, tenderam a elevá-lo.

Tal situação também é encontrada para a bacia hidrográfica do rio Pajeú em relação ao clima, porém, com elevação mais acentuada no regime de vazão em função dos cenários futuros *LULC* que tenderam a lhe gerar maiores volumes devido à parametrização do modelo *MGB-IPH*.

#### 7.4. NO QUE OS RESULTADOS DA MODELAGEM HIDROLÓGICA DE CENÁRIOS FUTUROS DE CLIMA E LULC PODEM AUXILIAR NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS?

Embora os resultados apresentados por cada cenário climático não tenham sido tão semelhantes entre si, ou seja, cada um apresentando sua previsão, eles apontam para possíveis previsões ou situações hipotéticas plausíveis as quais indicam o que aconteceria nas bacias hidrográficas no caso de cenários climáticos extremos em ambos os sentidos, ou seja, que visam um clima mais seco ou mais úmido.

Nesse sentido, é preciso considerar que em todos os cenários analisados, os impactos sobre as atividades humanas serão alarmantes. Para fins de exemplo, os panoramas *Eta-HadGEM* e *Eta-BESM* apresentaram resultados que mostraram a elevação da vazão na bacia hidrográfica do rio Capibaribe. A princípio pode passar uma falsa sensação de que essa terá mais água disponível e que esse fato pode ser considerado como um impacto benéfico. Porém, é preciso pensar um pouco mais além do que apresentam os resultados da presente pesquisa.

Nesse contexto, é preciso ressaltar que a bacia hidrográfica do rio Capibaribe é um ambiente bastante antropizado. Grandes metrópoles, a exemplo do município de Recife, encontram-se em seus limites. A capital pernambucana é uma cidade que sofre bastante nos períodos chuvosos com alagamentos e inundações das áreas ribeirinhas, sendo sempre necessário adotar medidas mitigatórias para evitar esse tipo de situação e diminuir o impacto desses problemas por parte dos gestores.

Nesse sentido, considerando que o cenário *Eta-HadGEM* e *Eta-BESM* venham de fato a acontecer, o aumento da vazão acarretará mais impactos adversos em relação aos alagamentos e inundações no município de Recife. Por outro lado, caso as amostras climáticas *Eta-MIROC* e *Eta-CanESM* ocorram, tal fenômeno da bacia hidrográfica do rio Capibaribe irá diminuir e, conseqüentemente, a disponibilidade hídrica, o que poderá impactar a população dos municípios que fazem uso direto de sua água, seja para abastecimento, irrigação ou para pesca e piscicultura.

Um exemplo do possível impacto ocasionado pelas mudanças climáticas no município de Recife foi encontrado no trabalho de Verçosa (2019), que desenvolveu um estudo procurando avaliá-lo em relação às inundações na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, em particular na cidade de Recife, que enfrenta problemas com inundações. Os resultados dessa pesquisa mostraram uma redução de 82% e 57% na área inundada pelas cheias no cenário com a existência das barragens, mas caso não existisse a contenção por esse sistema, aumentaria a área inundada. Por outro lado, as simulações da elevação do nível dos mares indicam seu acréscimo em eventos similares.

Áreas urbanizadas são as que mais apontam as intervenções humanas em relação ao meio natural (BEICHLER *et al.*, 2017). O desmatamento, a ocupação desordenada do território, a impermeabilização do solo e as canalizações dos cursos d'água acarretam em diversos impactos sobre os rios.

Tais impactos são sentidos pelas populações, principalmente, através das enchentes, que é uma consequência da urbanização, tendo como causa as edificações, indústrias e avenidas

implantadas em áreas de várzea ou margens dos rios, sendo esse um problema recorrente nas principais cidades do mundo (BASSI *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2015).

Além do aumento da vazão, outro ponto que pode ser debatido é a questão referente ao assoreamento dos rios, algo que o modelo *MGB-IPH* não considera na simulação. Tal fator tem diferentes causas, porém a principal é o desmatamento (ZELLHUBER; SIQUEIRA, 2007). Com isso, os solos tendem a ficar mais expostos às intempéries, o que facilita o transporte dos depósitos sedimentares pelo escoamento.

Esses sedimentos são carregados até o leito do rio, ocasionando o seu assoreamento, diminuindo a profundidade da sua calha e, conseqüentemente, a quantidade de água acumulada no período de estiagem, mas aumenta área acumulada nos períodos chuvosos em função da grande quantidade de chuva e pouco profundidade da calha do rio, aumentando, também, o impacto das possíveis enchentes. Nesse contexto, não é porque o modelo hidrológico acusa que o cenário futuro está gerando mais vazão que isso pode ser considerado um impacto benéfico. É preciso considerar outras variáveis e como essas tendem a se comportar no meio natural.

Também é preciso considerar que as políticas públicas geralmente trabalham com o objetivo de realizar o desassoreamento dos rios. Porém, para isso, torna-se necessário realizar estudos referentes a ictiofauna dos rios.

De acordo com Smith, Silva e Biagioni (2019), o desassoreamento pode resultar em prejuízos para a ictiofauna, pois ao realizar esse tipo de intervenção, a movimentação e a remoção de sedimento do leito do rio pode causar soterramento e morte massiva de ovos e larvas, causando sua morte, além de destruir habitats específicos para a desova dessas espécies e também de outras que não migram.

Para mitigar esse impacto, a escolha da época para a realização do desassoreamento deve ser considerada, evitando os períodos de desovas, de migração e reprodução dos peixes. Já para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú, os resultados apresentados pelos cenários climáticos *Eta-MIROC* e *Eta-CanESM* podem desertificar a região em função do déficit hídrico, impossibilitando que a vegetação prolifere. Além de afetar, ainda mais, a segurança hídrica.

Até mesmo os cenários *Eta-HadGEM* e *Eta-BESM*, que preveem condições mais úmidas, podem acelerar o processo de desertificação na bacia do rio Pajeú, uma vez que os solos dessa região são mais rasos e tenderão a receber mais água que o normal. E, como a evapotranspiração é uma força sempre atuante no semiárido, o solo perderá água para a atmosfera e, nesse processo, por forças capilares, o sal presente no solo será carregado juntamente com água que está sendo evaporada até a sua superfície, acrescentando uma

camada de sal superficial no solo (SARAIVA FILHO; BONILLA, 2022.) Esse processo afeta o reproduzir da vegetação e é frequentemente encontrando em áreas com solos rasos, áridos e semiáridos.

Esses estudos foram elaborados com base em cenários que mostram os possíveis impactos das alterações climáticas. Seus resultados por mais hipotéticos que possam parecer, apresentam dados importantes para a gestão dos recursos hídricos, podendo ser utilizados pelos seus respectivos gestores com o objetivo de adotar medidas mitigatórias, sendo necessário considera-los a fim de ter uma imediata solução para os cenários futuros que possam vir a acontecer.

## 8. CONCLUSÃO

O modelo *LCM* mostrou ser uma ferramenta eficiente para prever alterações *LULC* em diferentes bacias hidrográficas. Porém, as magnitudes das transições de uma classe para outra ocorrem muito em função da área ocupada por cada tipo de uso e povoamento da terra, ou seja, seu tamanho determina o potencial de transformação do *LCM*, sendo esse um fator que pode impossibilitar a utilização do modelo para prever determinadas transições de categorias desses fatores.

A evolução do uso e ocupação da terra para a bacia hidrográfica do rio Pajeú mostrou pouco desenvolvimento da malha urbana até o ano de 2017. A maior parte da sua vegetação natural ainda se encontra conservada. Já a bacia do rio Capibaribe mostrou que o cerrado caatinga ainda ocupa boa parte de sua área, porém a florestal - mata atlântica - já está bastante desmatada, ocupando a pastagem e a agricultura áreas consideráveis.

O modelo *MGB-IPH* apresentou desempenho satisfatório na simulação hidrológica em diferentes bacias hidrográficas, conseguindo representar a variabilidade climática da do rio Capibaribe que compreende desde um clima mais úmido a seco, assim como apresentou resultados satisfatórios ao simular uma de clima semiárido como a do rio Pajeú.

Apresentando essa amostra, ainda, eficiência para simular impactos provindos de diferentes cenários *LULC* sobre o regime de vazão e processos hidrológicos, porém sendo necessário demandar atenção especial para a parametrização do modelo e, também, para a definição da quantidade de classes da URH a fim de poder definir se a substituição da vegetação natural por pastagem e agricultura acarretará alterações positivas ou negativas dos volumes de vazão.

Mas é importante ressaltar que o tamanho da área ocupada pelo tipo de uso da terra tem forte influência no parâmetro  $W_m$ , ou seja, quanto maior área ocupada, maior será a sensibilidade do modelo. Isso pode ser um problema nas amostragens de bacias hidrográficas com cenários *LULC* muito antropotizado.

Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, os cenários futuros *LULC* mostram que maiores volumes de vazão tendem a ocorrer na região mais a sul da bacia, que é onde podem ocorrer maiores transições de vegetação caatinga para pastagem e agricultura.

O modelo *MGB-IPH* também mostrou eficiência para simular os impactos das alterações climáticas sob o regime de vazão. Os cenários *Eta-BESM* e *Eta-HADGEM* são os

que apresentam condições mais amenas de sua diminuição para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

No período chuvoso, o *MGB-Eta-BESM* é o que apresenta alterações mais positivas na vazão para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe. As simulações do *Eta-CANESM* e *Eta-MIROC* indicam-lhe condições mais severas ao tempo que o segundo apresenta condições mais austeras para a bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Os cenários climáticos no período baseline apresentam sazonalidade semelhante à simulação com dados observados, mas com pequenas diferenças na bacia hidrográfica do Rio Pajeú e significativas divergências na precipitação, temperatura e vazão para a do rio Capibaribe. Pode-se concluir que as alterações climáticas mostraram ser um fator mais impactante em relação a alterações positivas ou negativas do regime do terceiro fenômeno mencionado. E que, quando associado aos cenários *LULC*, os dois fatores podem acarretar impactos de maiores proporções.

A modelagem hidrológica apresenta capacidade em representar simulações dos impactos das alterações climáticas e cenários *LULC* no regime de vazão. No entanto, em relação a esse panorama, é preciso demandar uma atenção maior na definição das *URHs* do modelo *MGB-IPH* de modo a proporcionar maior controle do parâmetro *Wm*. Desse modo, pode-se afirmar que a hipótese foi confirmada.

Por fim, percebeu-se que os cenários climáticos *Eta-BESM*, *Eta-HADGEM*, *Eta-CANESM* e *Eta-MIROC* apresentaram previsões diferentes para ambas as bacias hidrográficas, não revelando um panorama futuro do clima em comum. Também foi possível perceber que o primeiro e o segundo cenários climáticos estão prevendo o aumento da vazão em ambas as bacias hidrográficas analisadas, ao tempo que o terceiro e o quarto preveem sua diminuição.

Como recomendações, ressalta-se a necessidade de aprofundamento nos tópicos:

- Adoção de critérios para definição dos parâmetros das *URHs* ao utilizar o modelo *MGB-IPH*. Apesar de o manual dessa amostra orientar para a utilização daquelas com seis classes e relatar que *URHs* com mais de doze classes não apresentam diferenças significativas na simulação, torna-se necessário verificar o tamanho da área de cada classe sua para auxiliar no momento de definição dos parâmetros de modo a permanecer dentro dos seus limites aceitáveis e para que estudos futuros possam vir a utilizar o *MGB-IPH* para verificar a influência de cenários *LULC* sobre a vazão e considere o que a literatura relata em relação ao tema em questão no momento de apresentar resultados da sua aplicação;

- Os modelos climáticos representam satisfatoriamente a sazonalidade temporal da precipitação pluviométrica, no entanto, alguns estudos relatam inconsistências em relação à distribuição espacial da precipitação. Desse modo, faz-se necessário desenvolver estudos com o objetivo de verificar a sua distribuição espacial em diferentes regiões com seus dados presentes no modelo regional *Eta/CEPTEC* considerando todos os cenários dos *MCGs* utilizados.
- Por fim, é interessante analisar o comportamento geral das variáveis climáticas emergidas por cada modelo e cenário de clima com o objetivo de analisar padrões comportamentais independentes das regiões, ou seja, se o *Eta-HADGEM* apresenta tendências mais negativas ou positivas de alterações climáticas, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

ADAM, K. N., FAN, F. M., PONTES, P. R., MARTIN, J., COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH vol. 20 no.4 Porto Alegre out./dez. p. 999 – 1007, (2015). [10.21168/rbrh.v20n4.p999-1007](https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p999-1007)

ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W. FAN, F. MARTIN, J. Influência da técnica de remoção de viés aplicada em estudos de mudanças climáticas na bacia do rio Uruguai. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis** (2017).

AGUIAR, A. P.; CARNEIRO, T.; ANDRADE, P. ASSIS, T. LuccME-TerraME: an open-source framework for spatially explicit land use change modelling. Newsletter of the Global Land Project. **GLP - a Joint Research Agenda OF IGBP & IHDP**. ISSUE no. 8. March 2012.

ALBUQUERQUE, R. D. Estudo Comparativo de Algoritmos de Classificação Supervisionada para Classificação de Polaridade em Análise de Sentimentos. Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação. Recife, 2019.

ALVARENGA, L. A. MELLO, C. R., COLOMBO, A., CUARTAS, L. A. CHOU, S. C. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. **Ciência e Agrotecnologia** 40(6):647-657, Nov/Dec (2016). <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542016406027716>

ALEMAYEHU, S.; AYANA, EK; DILE, YT; DEMISSIE, T.; YIMAM, Y.; GIRVETZ, E.; AYNEKULU, E.; SALOMÃO, D.; WORQLUL, AW. valuating Land Suitability and Potential Climate Change Impacts on Alfalfa (*Medicago sativa*) Production in Ethiopia. **Atmosphere** 2020, 11, 1124. <https://doi.org/10.3390/atmos11101124>

ANDRADE NETO, J. V (2022). Simulação Hidrológica de Grandes Bacias Semiáridas com Densas Redes de Açudes e Poucos Dados. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-

graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

APAC, 2023. Agência pernambucana de águas e clima. Disponível em <https://www.apac.pe.gov.br/169-bacias-hidrograficas-rio-pajeu/202-bacia-do-rio-pajeu>.

Acessado em 16 de setembro de 2023.

ARRAUJO, A. S. Calibração do Modelo MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró. Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil. (2017)

ARROIO JUNIOR, P. P., MAUAD, F. F. Simulação dos impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do Ribeirão do Feijão – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH** VOL. 20 N°.3 Porto Alegre, P. 741 – 751, JUL./SET. 2015.

ASSIS, J. M. A; SOUSA, W. M; SOBRAL, M. C. Análise Climática da Precipitação no Submédio da Bacia do Rio São Francisco a Partir do Índice de Anomalias de Chuva. **Revista Brasileira De Ciências Ambientais**. S/V, N. 36, P. 115-127, 2015.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, 47, 1–18, 2011.

BAYER. D. M.; COLLISCHONN. W. Análise da sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças do uso da terra. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Volume 18 n.3 –.165-179. Jul/Set, 2013.

BASSI, N.; KUMAR, M. D.; SHARMA, A.; PARDHA-SARADHI, P. Status of wetlands in India: A review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 2, p. 1–19, 2014.

BATES, B. C.; ZBIGNIEW, W. K.; WU, S.; PALUTIKOF J. P., **El Cambio Climático y el agua**, Secretaría del IPCC, Ginebra. (2008).

BEICHLER, S.; HAASE, D.; HEILAND, S.; KABISCH, N.; MÜLLER, F. Does the Ecosystem Service Concept Reach its Limits in Urban Environments? **Landscape** online, v. 51, p. 1 - 21, 2017.

BESERRA, P.S. (2016). Avaliação dos efeitos das alterações na cobertura e uso do solo sobre o regime de vazões via modelagem hidrológica considerando incerteza paramétrica. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 194/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p

BEZERRA, J. M. Estimativa da Evapotranspiração Real para Área de Caatinga Utilizando Sebal. Dissertação submetida à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA). Recife, 2013.

BLAINSKI, E.; ARAUJO, I. S.; GOMES, P. Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33. 2010, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: 2010

BLAINSKI, É.; PORRAS, E. A. A.; GARBOSA, L. H. P.; PINHEIRO, A. Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Versão On-line ISSN 2318-0331. RBRH, Porto Alegre, v. 22, e33, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716110>

BRITO, A. L.; VEIGA, J. A.; CORREIA, F. W.; CAPISTRANO, V. B. Avaliação do Desempenho dos Modelos HADGEM2-ES e Eta a partir de Indicadores de Extremos Climáticos de Precipitação para a Bacia Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, 165 177, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863340003>

BRITO NETO, R. L. Simulação Hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo em Diferentes Cenários de Uso e Ocupação do Solo. Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre. 2018.

BRITO NETO, R. L.; TAGLIAFERRE, C. LEMOS, O. L.; ROCHA, F. A.; PAULA, A. Application of the MGB-IPH model in the Pardo River hydrographic basin in different scenarios of use and occupation of the soil. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 191-213, jan./mar. 2021 • <https://doi.org/10.5902/1980509836095>

BRITO NEVES, B. B. *et al.* A tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. Belo Horizonte, **Geonomos**, v. 3, n. 2, p.1-21, 1995.

CARDOSO, G. M.; JUSTINO, F. Simulação dos componentes da evapotranspiração sob condições climáticas atuais e de cenários climáticos futuros de aquecimento global com o uso de modelos de clima-vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.1, 85 - 95, 2014

CAMPOS, M. T.; HIGUCHI, F. G. A Floresta Amazônica e seu papel nas mudanças climáticas. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. 36 p. Manaus, 2009.

COCCONI, J. K. Investigações das Mudanças no uso e Ocupação do Solo Na Bacia Taquari-Antas e suas Possíveis Influências nas Vazões. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. 2019.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, p. 37-46, 1960

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I. *et al.* Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014.

CHOU, S.C, LYRA, A. , MOURÃO, C. , DEREZYNSKI, C. , PILOTTO, I. , GOMES, J. , BUSTAMANTE, J. , TAVARES, P. , SILVA, A. , RODRIGUES, D. , CAMPOS, D. , CHAGAS, D. , SUEIRO, G. , SIQUEIRA, G. MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**,3, 512-527 2014b. doi:10.4236/ajcc.2014.35043

COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica De Grandes Bacias. Tese Submetida Ao Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Recursos Hídricos E Saneamento Ambiental Da Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul Como Requisito Parcial Para A Obtenção Do Título De Doutor Em Engenharia. Ano: 2001.

COLLINS, W.J., BELLOUIN, N., DOUTRIAUX-BOUCHER, M., GEDNEY, N., HALLORAN, P., HINTON, T., HUGHES, J., JONES, C.D., JOSHI, M., LIDDICOAT, S., MARTIN, G., O'CONNOR, F., RAE, J., SENIOR, C., SITCH, S., TOTTERDELL, I., WILTSHIRE, A., WOODWARD, S. Development and evaluation of the Earth-System model-HADGEM2. **Geoscientific Model Development** (2011). <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. M. Simulação Hidrológica de Grande Bacias. Rbrh – **Revista Brasileira De Recursos Hídricos**. Volume 16 N1. 95 – 100. Jan/Mar 2001.

Collischonn, W.; Tucci, C. E. M.; Clarke, R. T. (2001) Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: **Part of a wider phenomenon of climate change?** *Journal of Hydrology*, v.245, p.218-238.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH Model for Large-Scale Rainfall-Runoff Modelling. **Hydrological Sciences Journal**, V. 52, N. 5, P. 878-895, 2007. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

COSTA, F, P. D; BUARQUE, D. C; BRÊDA, J. P. L. F.; FÖEGER, L. B. Impact of climate change on the flow of the Doce River basin. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Brazilian Journal of Water Resources. Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH, Porto Alegre, v. 27, e34, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220069>

CPRM, 2023. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Disponível em <https://www.sgb.gov.br/>. Acessado em 23 de julho de 2023.

CRUZ, M. A. S; MOTA, P. V. M; ARAGÃO, R; ROCHA, R. O. F. Evaluation of the precipitation generated by the regional climate model ETA-HADGEM2-ES for the State of Sergipe. **Scientia plena** 13, 109913. (2017). DOI 10.14808/sci.plena.2017.109913.

DIKI, V. N.; SHIMIZU, H. M.; D. M. LIN, Z.; NWOFOR, O. K. CHINEKE, T. C. Modelling present and future African climate using CMIP5 scenarios in HADGEM2-ES. **Intenational Journal of Climatology**, vol. 8, 0899-8418 (2015). <https://doi.org/10.1002/joc.4084>

DOSDOGRU, F.; KALIN, L.; WANG, R.; YEN, H. Potential Impacts Of Land Use/Cover And Climate Changes On Ecologically Relevant Flows. **Journal Of Hydrology** 584, 124654, 2020. <HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JHYDROL.2020.124654>

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de Reconhecimento de Baixa e Média Intensidade dos Solos do Estado de Pernambuco. Boletim de Pesquisa. Rio de Janeiro, EMBRAPA Solos, 2000.

EMBRAPA SOLOS. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2006. 306 p.

ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; RIBEIRO NETO, A. Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 81-91, 2013. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p81-91>

EASTMAN, J. R. TERRSET: Geospatial Monitoring And Modeling System - Manual, Clark Labs - Clark University, 2016.

ESTOQUE, R. C.; OOBA, M.; AVITABILE, V.; HIJIOKA, Y. DASGUPTA, R. TOGAWA, T.; MURAYAMA, Y. The Future Of Southeast Asia's Forests. **Nature Communications**. V. 10, **Article Number**: 1829, 2019.

FARINOSI, F., ARIAS, M. E., LEE, E., LONGO, M., PEREIRA, F. F., LIVINO, A. Future climate and land use change impacts on river flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. **Earth's Future**, 7, 993–1017, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EF001198>

FEARNSIDE, P. Rios voadores e a água de São Paulo 3: A sazonalidade do transporte. **Amazônia Real**, Manaus, p. 1-5, 22 fev. 2015.

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. RBRH, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 556-569, jul./set, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>

FERNANDES, R. O.; SILVERA, C. S.; STUDART, T. M. C.; SOUZA FILHO, F. A. (2017) Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe basin-ce in climate change scenarios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, V. 22, E11. <HTTP://DX.DOI.ORG/10.1590/2318-0331.011716033>

FERREIRA, P. S., GOMES, V. P., SANTOS, A. M., MORAIS, Y. C. B., MIRANDA, R. Q., FERREIRA, J. M. S., GALVÍNCIO, J. D. Análise do cenário de suscetibilidade à desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú - estado de Pernambuco. **Scientia Plena**. VOL. 10, Nº. 10. 2014.

FOLHARINI, S.; OLIVEIRA, R. Utilização do Land Change Modeler na modelação prospetiva do uso e cobertura do solo na microrregião de santos, brasil para o ano de 2022. *Revista De Geografia e Ordenamento do Território (Got)*, N.º 19 (Junho). **Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território**, P. 57-73, 2020. <DX.DOI.ORG/10.17127/GOT/2020.19.003>

FONTOLAN, M. R. Modelos Climáticos Eta-HADGEM2-ES e Eta-MIROC5 no Estudo de Eventos Extremos no Estado de São Paulo. Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração em Gestão dos Recursos Agroambientais (2019).

FRONE, D., FRONE, S. The importance of water security for sustainable development in the romanian agri-food sector. **Agriculture And Agricultural Science Procedia** 6, 674 – 681, 2015;

FUJACO, M. A.G.; LEITE, M. G. P. Padrões da evapotranspiração e índice de NDVI nos diferentes usos de cobertura do solo em três sub bacias do rio Paracatu/MG. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. F. A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A, L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1283-1296, 2008.

GÊNOVA, K. B. HONDA, E. A. DURINGA, G. N. Processos hidrológicos em diferentes modelos de plantio de restauração de mata ciliar em região de cerrado. **Revista do instituto florestal**, São Paulo, VOL. 19, N. 2, P. 189-200. DEZ. 2007.

GERRITS, A. M. J.; SAVENIJE, H. H. G. Interception. **Treatise on Water Science**, n. 1971, p. 89–101, 2011

GODIN, R. S., FUCK JUNIOR, S. C. F., EVANGELISTA, S. R. M. Impacto Das Mudanças Climáticas na Evapotranspiração em Nível de Bacia Hidrográfica Utilizando um Sistema de Informações Geográficas. RBRH — **Revista Brasileira De Recursos Hídricos** Volume 16 N.2, 5-12, ABR/JUN 2011;

GONÇALVES, F.N.; BACK, A.J. Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 43, n. 3, p. 592-602, 2018.

GREY, D, AND SADOFF, C. W. “Water For Growth And Development” In Thematic Documents Of The Iv World Water Forum. **Comision Nacional Del Agua**: Mexico City. 2006;

HAYLOCK M.R.; PETERSON T.; ALVES L.M.; AMBRIZZI T.; ANUNCIACÃO Y.M.T. *et al.* Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006

HÖRMANN, G. *et al.* Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 79, n. 3, p. 131–148, 1996.

IBGE, 2022. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Censo Demográfico 2022. Acessado em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/panorama>

IPCC, 2012. Managing The Risks Of Extreme Events And Disasters To Advance Climate Change Adaptation. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8845-7>

IPCC 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

JATI, D. A., SILVA, J. T. (2017). Estudos geo-hidrológicos da bacia do rio Curuá-Una, Santarém, Pará: Aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH). **Revista Brasileira de Geografia Física** v.10, n.04 (2017) 1296-1311. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1296-1311>

JACOMINE, P. T. *et al.* Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. **Divisão de Pesquisa Pedológica**, vol. 1. (Boletim Técnico 26, Pedologia 14). Recife, PE, 1973.

JATI, D. A. Estudos hidro-climatológicos da bacia do rio Curuá-una: aplicação do modelo de grandes bacias (MGB-IPH). Dissertação apresentada à Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Recursos Naturais da Amazônia. 2017.

KOCH, H.; SILVA, A. L. C.; LIESCH, S. AZEVEDO, J. R. G.; HATTERMANN, F. F. Effects Of Model Calibration On Hydrological And Water Resources Management Simulations Under Climate Change In A Semi-Arid Watershed. **Climatic Change** 163:1247–1266, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s10584-020-02917-w>

KUJAWA, H.; KALCIC, M. MARTIN, J.; ALOYSIUS, N.; APOSTEL, A.; KAST, J; MURUMKAR, A., EVENSON, G.; BECKER, R.; BOLES, C.; CONFESOR, R.; DAGNEW, A.; GUO, T., MUENICH, R. L.; REDDER, T. SCAVIA, D., WANG, Y. The Hydrologic Model As A Source Of Nutrient Loading Uncertainty In A Future Climate. **Science of The Total Environment** 724. 138004, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138004>

KUSANGAYA, S.; WARBURTON, M. L.; VAN GARDEREN, E. A.; JEWITT, G. P.W. Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review. **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, Volumes 67–69, 2014, Pages 47-54, ISSN 1474-7065,

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.014>

LANDIS, J.R. e KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p. 159-174, 1977.

LATUF, M. O. Modelagem Hidrológica Aplicada a Modelagem dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Acre. Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Em Geografia Da FCT/Unesp. Presidente Prudente. Ano: 2011.

LEITE, A. P.; SANTOS, G. R.; SANTOS, J. E. O. Análise temporal dos índices de vegetação NDVI e SAVI na estação experimental de Itatinga utilizando imagens landsat 8. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 2017.

LI, H. ZHANG, Y. VAZE, J. WANG, B. Separating Effects Of Vegetation Change And Climate Variability Using Hydrological Modelling And Sensitivity-Based Approaches. **Journal of Hydrology** 420–421, 403–418, 2012.

LINO, J. L. F. Análise da dinâmica hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT. 2009. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

LYRA, A., TAVARES, P., CHOU, S.C., SUEIRO, G., DEREZYNSKI, C.P., SONDERMANN, M., SILVA, A., MARENGO, J., GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution **Theoretical and Applied Climatology**. (2017). doi:10.1007/s00704-017-2067-z.

LOBATO, R.; MENEZES, J.; LIMA, L. A.; SAPIENZA, J. A. Índice de vegetação por diferença normalizada para análise da redução da mata atlântica na região costeira do distrito de Tamoios – Cabo Frio/RJ. **Caderno de Estudos Geoambientais - CADEGEO**. v.01, n.01, p.14-22, 2010.

LORENZO, A. S. Processos hidrológicos em um fragmento de floresta Estacional semidecidual no município de Viçosa, MG. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. 2011.

KEIM, R. F.; SKAUGSET, A. E.; WEILER, M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1–4, p. 263–274, nov. 2005.

MACIEL, S.A. Análise da relação chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, Brasil. 2017. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Geografia e Gestão do Território, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MAGALHÃES, A. G.; MONTENEGRO, A. A. A.; ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Hydrological Modeling Of An Experimental Basin In The Semiarid Region Of The Brazilian State Of Pernambuco. **Revista. Ambiente e Água**. VOL. 13 N. 6, E2204, 2018. - Taubaté. DOI:10.4136/AMBI-AGUA.2204

MAIA, A. H. N.; GONDIM, R. S.; MARQUES, A. Destreza do modelo Eta-HADGEM-ES para a Bacia do rio Jaguaribe: projeções de chuva. **Água e agricultura: incertezas e desafios para a sustentabilidade frente às mudanças do clima e do uso da terra: anais**, 2016.

MASULLO, Y. A. G.; RANGEL, M. E. S., Uso e ocupação do solo e alterações climáticas na ilha do Maranhão. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, V.2, N.5, p.663 – 674 , 2012.

MARASLIS, G. T. Influência do uso e ocupação do solo na geração de Escoamento superficial de uma pequena bacia costeira utilizando o modelo SWAT. Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. (2022)

MARENGO, J.A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 79-96, 2004.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI, Ministério do Meio Ambiente, Brasília. (2006).

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; CHOU, S.C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES L.M.; OBREGÓN, G.O.; SOARES, W.R.; BETTS, R.; KAY, G. Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: Análise Conjunta Brasil Reino Unido Sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia. Projeto colaborativo realizado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Brasil e o Met Office Hadley Centre (MOHC), do Reino Unido. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 55 p., 2011.

MARENGO, J.A.; CHOU, S.C.; KAY, G.; ALVES, L.M.; PESQUERO, J.F.; SOARES, W.R.; SANTOS, D.C.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012.

MARTINI, E. A. Aplicação do Modelo SMAP para Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas: Um Estudo de Caso para a Bacia de Camargos (MG). Monografia de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. (2015).

MARTINS. C. R. S.; SANTOS, A. M. M.; COSTA, D. S.; LIMA, S. R.; PISCOYA, V. C.; CALADO, G. Q.; MICHELON, G. K.; NASCIMENTO, M. R.; SANTOS, P. R. CAVARLHO,

R. R. C. Influência da Vegetação na Erosão Hídrica em Ambiente Semiárido: Uma Revisão De Literatura. **XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VII Encontro de Iniciação à Docência** – Universidade do Vale do Paraíba, 2017.

MARTINS, E. S. P. R.; BRAGA, C. F. C.; DE NYS, E.; FILHO, F. DE A S; FREITAS, M. A. S. Impacto das Mudanças do Clima e Projeções de Demanda Sobre o Processo de Alocação de Água em Duas Bacias do Nordeste Semiárido – 1ª edição (revisada) – ISBN 978-85-63879-06-6. Brasília – 2013.

MELLO, A. Y. I.; ALVES, D. S.; LINHARES, C. A.; LIMA, F.B. Avaliação de técnicas de classificação digital de imagens Landsat em diferentes padrões de cobertura da terra em Rondônia. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.3, p.537-547, 2012.

MELO, C. G. B.; FERNANDES, G. S. T.; LOPES, P. M. O.; OLIVEIRA, V.B.; PESSOA, V. G. Variação Espaço-Temporal da Evapotranspiração em Áreas de Caatinga no Sudoeste Piauiense. *Rev. Geociênc. Nordeste, Caicó*, v.7, n.2, (Jul-Dez) p.253-259, 2021. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24343>

MENDONÇA, L. A. R., VÁSQUEZ, M. A. N., FEITOSA, J. V. OLIVEIRA, J. F., FRANCA, R. M., VÁSQUEZ, E. M. F., FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Engenharia Sanitária Ambiental*. V.14, N.1, JAN/MAR, P. 89-98, 2009.

MENEZES, M. C. Efeito do uso do solo sobre a vegetação: estudo de caso em Inselberg no Cariri paraibano. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba. (2016).

NEGUEIROS, B. M. F. Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Seridó. Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil. 2017.

NETO, A.R., DA PAZ, A.R., MARENGO, J.A. AND CHOU, S.C. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. **Journa of Water Resource and Protection**, 8, 1103-1127 (2016). <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>

NOBREGA, M. T. COLLISCHONN, W. PAZ, A. R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences. Sci.**, 15, 585–595, (2011) [www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/585/2011/doi:10.5194/hess-15-585-2011](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/585/2011/doi:10.5194/hess-15-585-2011)

NUNES, L. H., LOMBARDO, M. A., A Questão da Variabilidade Climática: Uma Reflexão Crítica. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, 16 (1/2), 21-31, Jan.-Dez. 1995.

OLMDEDO, M. T. C.; PAEGELOW, M.; MAS, J. F. Interest In Intermediate Soft-Classified Maps In Land Change Model Validation: Suitability Versus Transition Potential. **International Journal Of Geographical Information Science**, V. 27, N. 12, P. 2343-2361, (2013) DOI: <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.831867>.

O'NEILL, B. C., TEBALDI, C., VAN VUUREN, D. P., EYRING, V., FRIEDLINGSTEIN, P., HURTT, G., KNUTTI,R., KRIEGLER, E., LAMARQUE, J.-F., LOWE, J., MEEHL, G. A., MOSS, R., RIAHI, K., AND SANDERSON, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, **Geoscientific Model Development**., 9, 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016.

PELINSON, D. Análise da variação nas vazões frente a cenários de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Rio Negro – RS. Trabalho de conclusão apresentado ao instituto de pesquisas hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.

PERNAMBUCO. “Plano estadual de recursos hídricos”. Secretaria Estadual de Recursos Hídrico, Recife – PE (2022). Disponível em: <http://www.sectma.pe.gov.br/perh-pe/index.html>.

PERNAMBUCO, Plano Hidroambiental da bacia Hidrográfica do rio Capibaribe: Resumo Executivo / Projetos Técnicos. Recife, 2010. Disponível em:

[https://www.apac.pe.gov.br/images/media/1649787904\\_TOMO%20IV%20-%20Resumo%20Executivo.pdf](https://www.apac.pe.gov.br/images/media/1649787904_TOMO%20IV%20-%20Resumo%20Executivo.pdf)

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos. Plano Estratégico de Recursos Hídricos e Saneamento. Coordenação Técnica Amaury Xavier De Carvalho. Recife: A Secretaria, 2008.

PONTES, P. R. M. COLLISCHONN, W. The Muskingum-Cunge-Todini streamflow routing model in floodplain rivers. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH vol. 20 no .2 Porto Alegre abr./jun. 2015 p. 298 – 309. (2015).

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A; KAUFMANN, V. Effects of Scenarios of Landuse on Water Regime and Sediment Transport in the Concórdia River Basin., SC. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.5, p.859-869 (2013).

QUEIROZ JÚNIOR, V. S.; MARTINS, A. P.; WACHHOLZ, F; CABRAL, J. B. P.; BARCELOS, A. A. Uso do índice de vegetação por diferença normalizada (ndvi) associado à quantidade de concentração de sólidos em suspensão (CSS) na bacia hidrográfica da UHE de Caçu, Goiás. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves/RS, 2013.

RUGGIERO, P. G. C.; PIVELLO, V. R.; SPAROVEK, G. TERAMOTO, E.; PIRES NETO, A. G. Relação entre solo, vegetação e topografia em área de cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): como se expressa em mapeamentos? **Acta Botanica Brasilica** 20(2): 383-394, (2006).

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Água e sustentabilidade no sistema solo-planta-atmosfera. Barueri, SP: Manole, 2016. ISBN 978-85-20-4679-9.

RIBEIRO JUNIOR, L. U.; ZUFFO, A. C.; SILVA, B. C. Development of a Tool For Hydroelectric Reservoir Operation With Multiple Uses Considering Effects of Climate Changes. Case Study Of Furnas Hpp. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. RBRH VOL. 21 NO.2 PORTO ALEGRE. 300 – 313, 2016. DOI: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.21168/RBRH.V21N2.P300-313](http://dx.doi.org/10.21168/RBRH.V21N2.P300-313)

RIBEIRO NETO, A.; BARBOSA, R.I.; FILHO, P. F. A.; CIRILO, J. A. Uso do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH) em regiões semiáridas. In: **Conferência Internacional Sobre Água em Regiões Áridas e Semiáridas**, 2, 2007, Gravatá. Anais... Pernambuco: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

RIBEIRO NETO, A.; SCOTT, C. A.; LIMA, E. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CIRILO, J. A. Infrastructure sufficiency in meeting water demand under climate-induced socio-hydrological transition in the urbanizing Capibaribe River basin, Brazil – **Hydrology and Earth System Sciences Syst. Sci.**, 18, 3449–3459, 2014.

RODRIGUES, C.T.A.; ALMEIDA, A.Q.; SILVA, T.G.F.; PEREIRA, D.R. Conflict of land use in permanent preservation areas of the Pajeu river basin-PE, Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**. v.03, n.03, 2013.

RODRIGUES. M. T.; RODRIGUES. B. T; CAMPOS, S. Desempenho da classificação supervisionada em diferentes sistemas de informação geográfica. **XI Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 11, n. 5, pp. 25-37, 2015.

ROSENFELD, G. H., FITZPATRICK-LINS, K. A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, N. 2, P. 85-91, 1986.

SACRAMENTO, A. C. ZICKEL, C. S. ALMEIDA JR. Aspectos florísticos da vegetação de restinga no litoral de Pernambuco. **Sociedade de Investigações Florestais**. R. Árvore, Viçosa-MG, v.31, n.6, p.1121-1130, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000600017>

SAMPAIO, E. V. S. B. Vegetação e flora da caatinga - contribuição ao workshop avaliação e identificação de ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade do bioma caatinga, em petrolina, 5/2000. Recife: Associação Plantas do Nordeste – APNE / Centro Nordestino de Informações sobre Plantas – CNIP, 2002.

SANTOS, C. A.; BRITO, J. I. B. Análise dos Índices de Extremos para o Semiárido do Brasil e Suas Relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, V. 22, N. 3, P. 303-312. 2007.

SANTOS, T. S., CASTRO, A. A., SILVA, A. R., QUEIROZ, D.E.; SILVA, T.G.F. Projeção da suscetibilidade a desertificação em Pernambuco utilizando o modelo HADGEMES. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.10, n.04 1170-1179. (2017)  
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v.10.4.p1170-1179>

SANTOS, A. M.; GALVÍNIO, J. D.; MOURA, M. S. B.,. Os recursos hídricos e as mudanças climáticas: discursos, impactos e conflitos, **Revista Geográfica Venezolana**, núm. 51, pp. 59-68. (2010)

SANTOS, A. M.; GALVINCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. Mudanças climáticas e o escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Goiana - Pernambuco – Brasil. **Investigaciones Geográficas**, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 81 , pp. 51-65 (2013).

SANTOS, J.S., SANTOS, G. D. Estudo Microclimático em Pontos Representativos da Malha Urbana da Cidade de João Pessoa\PB: Uma Avaliação do Campo Térmico. **Revista Brasileira De Geografia Física**. V.6, N.5, 1430-1448, 2013.

SANTOS, J. Y. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; QUINN, N. W.; DANTAS, A. P. X.; RIBEIRO NETO, A. Modeling The Impacts Of Future Lulc And Climate Change On Runoff And Sediment Yield In A Strategic Basin In The Caatinga/Atlantic Forest Ecotone Of Brazil. **Catena** 203 105308. 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105308>

SANTOS, S. M. S., ASSIS, J. M. O., SOUZA, W. M. Tendências de Mudanças Climáticas na Bacia do Rio Una, Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física** V. 07, N. 02, 243-257, 2014.

SARAIVA FILHO, D. E.; BONILLA, O. H. Salinização secundária no semiárido e seus impactos no solo, na agricultura e cultivo das plantas – uma revisão. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 8, e49011831298, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31298>

SCHUSTER, R. C. Análise de cenários de mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica da Laguna dos Patos. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.

SCHUSTER, R. C., FAN, F. M., COLLISCHONN, W. Scenarios of climate change effects in water availability within the patos Lagoon's Basin.. **Brazilian Journal of Water Resources** Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH, Porto Alegre, v. 25, e9. (2020) <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190061>

SHAMA, A; PATEL, P. L.; SHARMA, P. J. Influence Of Climate And Land-Use Changes On The Sensitivity Of Swat Model Parameters And Water Availability In A Semi-Arid River Basin. **Catena** 215 10629, 2022.. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106298>

SILVA, A. M. Análise de Múltiplos Cenários Futuros Climáticos e de Uso e Cobertura Da Terra Na Estimativa de Vazões na Bacia do Rio Salgado, Semiárido Nordeste. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor. (2019)

SILVA, D. S.; MEDEIROS, J. D. F. Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH Na Bacia Hidrográfica Do Rio Piranhas-Açu Xiv **Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste**. Maceió-Alagoas, (2018).

SILVA, G. K.; MARCOS JUNIOR, A. D. LIMA, C. E. S.; SILVA, M. V. M.; SILVEIRA, C. S. Eta Model and CMIP5 Climate Change Projections for the São Francisco and Paraíba do Sul River Basins, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 38, e38210072, 2023 <https://doi.org/10.1590/0102-77863810072>

SILVA, R. B. M.; FRANCELINO, M. R.; MOURA, P. A.; MOURA, T. A.; PEREIRA, M. G.; OLIVEIRA, C. P. Relação solo/vegetação em ambiente de cerrado sobre influência do grupo Urucuia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 363-373, abr.-jun (2015).

SILVA, A. M.; SILVA, R. M. SANTOS, C. A. G.; LINHARES, F. M. XAVIER, A. P. C. Modeling the effects of future climate and landuse changes on streamflow in a headwater basin in the Brazilian Caatinga biome. **Geocarto International**. 1-26. (2022) 10.1080/10106049.2022.2068672.

SILVA JUNIOR, M. A. B; SILVA, R. S. A Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, Pernambuco-Brasil. **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste** (2014).

SILVA, T. M. DA; CAMELLO, T. C. F.; ALMEIDA, J. R. DE. Impactos ambientais hidrológicos ocasionados pelo desflorestamento metropolitano: Petrópolis, RJ. **Revista Sustinere**, v. 3, n° 1, p. 53–64, 2015.

SILVA, A. M. Análise de múltiplos cenários futuros climáticos e de uso e cobertura da terra na estimativa de vazões na bacia do rio Salgado, semiárido nordestino. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba. 2019.

SILVEIRA, C. S., SOUZA FILHO, F. A. MARTINS, E. S. P. R., OLIVEIRA, J. L., COSTA, A. C., NOBREGA, M. T., SOUZA, S. A., SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Versão On-line ISSN 2318-0331. RBRH vol. 21 no.2 Porto Alegre abr./jun. p. 416 – 428. (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p416-428>

SIQUEIRA JÚNIOR, L, TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D.A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. **Climatic change**, v. 129, n. 1-2, p. 117-129, 2015

SIRQUEIRA, P. C.; PONS, N. A. D.; SILVA, B. C. SIRQUEIRA JUNIOR, J.L.; MOREIRA, L. A. MARTINS, A. M. Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH para Simulação de

Cenários de Uso do Solo na Bacia do Rio Sapucaí (MG). **Revista Brasileira de Geografia Física** v.15, n.05 2414-2429 (2022).

SIRQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of Future Climatic and Land Cover Changes on The Hydrological Regime of The Madeira River Basin. **Climatic Change** 129:117–129, (2015). DOI 10.1007/S10584-015-1338-X

SISKA, E. M., TAKARA, K. Achieving Water Security in Global Change: Dealing with Associated Risk in Water Investment. **Procedia Environmental Sciences** 28, 743 – 749, (2015).

SMITH, W. S.; SILVA, F. L.; BIAGIONI, R. C. Desassoreamento de Rios: Quando o Poder Público Ignora as Causas, a Biodiversidade e a Ciência. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo. Vol. 22, 2019. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0057r1vu19L1AO>

SORRIBAS, M.V.; PAIVA, R.C.D.; MELACK, J.M.; BRAVO, J.M.; JONES, C.; CARVALHO, L. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **Climatic Change**, v. 136, n. 3-4, p. 555-570, 2016.

SORRIBAS, M. V., PAIVA, R.C., MELACK, J.M., BRAVO, J.M., JONES, C., CARVALHO, L., BEIGHLEY, E., FORSBERG, B. COSTA, M. H. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **Climatic Change**. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>

SOUZA, C.M., JR.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M.R.; PARENTE, L.L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B.F.T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; G. FERREIRA, L.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine - **Remote Sensing**, Volume 12, Issue 17, (2020) <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

SOUZA, R. M.; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; ALVEZ, M. V. G. AVANZI, C. J. Projeções Climáticas Regionalizadas para o Estado do Tocantins, Brasil, Nos Cenários RCP 4.5 E RCP 8.5. **Revista Brasileira De Climatologia**. Ano 15 – VOL. 24, 2019.

STEHMAN, S. V. Estimating the Kappa Coefficient and its Variance under Stratified Random Sampling. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, ABR., V. 62, N. 4, P. 401-402, 1996.

TANAJURA, C. A. S.; GENZ, F.; ARAÚJO, H. A. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos na Bahia: validação da Modelagem do Clima Presente. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** (2007).

TEJADA, G. DALLA-NORA, E. D. CÓRDOBA, D. LAFORTEZZA, R. OVANDO, A. ASSIS, T. AGUIAR, A. P. Cenários de desmatamento para as planícies bolivianas. **Pesquisa Ambiental**. Volume 144, Parte B, páginas 49-63, janeiro de 2016.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 2º Ed. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2º Ed. Editora da UFRGS. 2005.

UDDIN, K.; CHAUDHARY, S.; CHETTRI, N.; KOTRU, R.; MURTHY, M.; CHAUDHARY, R. P.; NING, W.; SHRESTHA, S. M.; GAUTAM, S. K. (2015). The Changing Land Cover And Fragmenting Forest On The Roof Of The World: A Case Study In Nepal's Kailash Sacred Landscape. **Landscape and Urban Planning**, V. 141, P. 1-10, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.003>

VALERIO, E. L. S., FRAGOSO JÚNIOR, C. R. (2015) Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da baciado rio Paraguaçu, BA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH vol. 20 no.4 Porto Alegre out./dez. p. 872 – 887.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Influência do Uso e Ocupação do Solo nos Recursos Hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.14, N.1, P.55–64, 2010.

VERÇOSA, L. F. M. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE. Dissertação apresentada ao Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. 2019.

VERGASTA, L. A.; CORREIA, F. W. S.; CHOU, S. C.; NOBRE, P.; LYRA, A. A.; GOMES, W. B.; CAPISTRANO, V. VEIGA, J. A. P. Avaliação do Balanço de Água na Bacia do Rio Madeira Simulado Pelo Modelo Regional Climático Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, 153-169, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863610005>

VELASCO, G. D. N., POLIZEL, J. L., COLTRI, P. P., LIMA, A. M. L. P. SILVA FILHO, D. F. Aplicação do Índice de Vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) em Imagens de Alta Resolução no Município de São Paulo e Suas Limitações. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Volume 2, Número 3, 2007.

WATANABE, M., SUZUKI, T., O'ISHI, R., KOMURO, Y., WATANABE, S., EMORI, S., TAKEMURA, T., CHIKIRA, M., OGURA, T., SEKIGUCHI, M., TAKATA, K., YAMAZAKI, D., YOKOHATA, T., NOZAWA, T., HASUMI, H., TATEBE, H. AND KIMOTO, M.. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate* 23(23) pp. 6312-6335. (2010). <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>

WELDE, K. GEBREMARIAMB, B. Effect of Land Use Land Cover Dynamics on Hydrological Response of Watershed: Case Study of Tekeze Dam Watershed, Northern Ethiopia 5. **International Soil and Water Conservation Research**. 1–16, (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.03.002>

WINDER, N., MCINTOSH, B.S., JEFFREY, P. The Origin, Diagnostic Attributes And Practical Application Of Co-Evolutionary Theory. **Ecological Economics** 54 (4), 347–361. 2005

WU, L.; ZHANG, X. FRANGHUA, H.; WU, Y.; LI, C. XU, L.. Evaluating The Contributions ff Climate Change and Human Activities to Runoff in Typical Semi-Arid Area, China. **Journal Of Hydrology**, 590 125555, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125555>

XAVIER, A. P. C.; SILVA, R. M. Modelagem Temporal Dinâmica do Uso e Ocupação do Solo Baseado em SIG para a Bacia Do Rio Tapacurá (PE). São Paulo, Unesp, **Geociências**, V. 37, N. 1, P. 193 - 210, 193, (2018).

ZULLHUBER, A.; SIQUEIRA, R. Rio São Francisco em descaminho: degradação e revitalização. **Revista Crítica de Humanidades**, n° 227, p. 3 - 24, 2007.





**ANEXO III- PARÂMETROS CALIBRÁVEIS DO MODELO PARA A BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO PAJEÚ**

Use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Urba_raso	200.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Agri_raso	400.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Past_raso	100.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Caat_raso	2600.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Caat_prof	2800.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Agua	0.0	0.1	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
CS	20.00						
CI	50.00						
CB	8000.00						
QB_M3/SKM2	0.0010						

**ANEXO IV– PARÂMETROS CALIBRÁVEIS DO MODELO PARA A BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE**

Use	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
flo/prof	400.0	0.12	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Caat/prof	200.0	0.13	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Past/prof	600.0	0.16	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Agri/prof	600.0	0.15	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Urb/prof	600.0	0.17	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Caat/raso	100.0	0.13	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Agua	0.0	0.1	0.08	4.00	0.67	0.00	0.10
CS	28.00						
CI	61.00						
CB	2000.00						
QB_M3/SKM2	0.0010						

**ANEXO V – CÓDIGO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NA  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PAJEÚ**

Código da estação	Latitude	Longitude
00737004	-7.68	-37.12
00737023	-7.73	-37.64
00737025	-7.80	-37.81
00737027	-7.86	-37.97
00737030	-7.91	-37.51
00737031	-7.36	-37.18
00737033	-7.71	-37.35
00737034	-7.93	-37.61
00737035	-7.71	-37.86
00737037	-7.58	-37.55
00738013	-7.73	-38.01
00738028	-7.85	-38.56
00738029	-7.86	-38.78
00738030	-7.98	-38.30
00738032	-7.83	-38.11
00738036	-7.91	-38.98
00837013	-8.18	-37.91
00837014	-8.35	-37.75
00837016	-8.41	-37.93
00837035	-8.06	-37.85
00837040	-8.48	-37.83
00838000	-8.53	-38.19
00838001	-8.06	-38.98
00838002	-8.23	-38.52
00838005	-8.28	-38.03
00838007	-8.43	-38.86
00838008	-8.33	-38.41
00838010	-8.66	-38.76
00838011	-8.48	-38.46
00838015	-8.08	-38.43
00838018	-8.38	-38.33
00838019	-8.61	-38.38
00838020	-8.61	-38.58
00838025	-8.11	-38.73
00838026	-8.16	-38.21
00838028	-8.03	-38.13
00838031	-8.00	-38.24
00838036	-8.23	-38.53

**ANEXO VI – CÓDIGO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NA  
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIBARIBE**

Código das estações	Latitude	Longitude
00735011	-7.73	-35.81
00735037	-7.60	-35.00
00735046	-7.85	-35.25
00735050	-7.96	-35.15
00735066	-7.89	-35.17
00735067	-7.94	-35.63
00735068	-7.83	-35.75
00735069	-7.83	-35.71
00735081	-7.90	-35.13
00735084	-7.96	-35.06
00735085	-7.91	-35.98
00735100	-7.87	-35.45
00735148	-7.93	-35.65
00735157	-7.84	-35.18
00735158	-7.85	-35.76
00735159	-7.91	-35.98
00736028	-7.96	-36.48
00736029	-7.93	-36.33
00736030	-7.95	-36.2
00736031	-7.90	-36.05
00736032	-7.88	-36.38
00736033	-7.96	-36.41
00736036	-7.85	-36.36
00736040	-7.98	-36.50
00736041	-7.96	-36.202
00736042	-7.90	-36.04
00834006	-8.05	-34.91
00834007	-8.05	-34.91

00835001	-8.06	-35.38
00835006	-8.01	-35.48
00835012	-8.00	-35.21
00835016	-8.01	-35.70
00835017	-8.01	-35.11
00835018	-8.20	-35.35
00835027	-8.00	-35.3
00835039	-8.15	-35.38
00835045	-8.16	-35.46
00835048	-7.99	-35.03
00835049	-8.41	-35.85
00835051	-8.10	-35.86
00835068	-8.11	-35.28
00835135	-8.01	-35.69
00835136	-8.00	-35.29
00835137	-8.14	-35.39
00836005	-8.15	-36.38
00836010	-8.13	-36.06
00836023	-8.10	-36.28
00836028	-8.10	-36.51
00836045	-8.23	-36.36
00836046	-8.08	-36.45
00836048	-8.16	-36.56
00836050	-8.10	-36.60
00836051	-8.13	-36.55
00836054	-8.01	-36.06
00836068	-8.15	-36.38
00836090	-8.016	-36.06
00836092	-8.145	-36.37
02611606	-8.05	-34.91
02611705	-8.13	-35.85
02616407	-8.12	-35.30