



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL

HIGOR COSTA DE BRITO

**RECURSOS HÍDRICOS E IMPACTOS ANTRÓPICOS NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO: DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL E CENÁRIOS PREDITIVOS**

Campina Grande - PB

2021

HIGOR COSTA DE BRITO

**RECURSOS HÍDRICOS E IMPACTOS ANTRÓPICOS NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO: DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL E CENÁRIOS PREDITIVOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.
Orientadora: Prof.^a Iana Alexandra Alves Rufino

Campina Grande - PB

2021

B862r

Brito, Higor Costa de.

Recursos hídricos e impactos antrópicos no semiárido brasileiro :
dinâmica espaço-temporal e cenários preditivos / Higor Costa de Brito. -
Campina Grande, 2021.

99 f. : il. Color

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e
Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino".

Referências.

1. Segurança Hídrica. 2. Uso do Solo. 3. Cenários Preditivos. 4.
Autômato Celular. 5. Geoprocessamento. I. Rufino, Iana Alexandra
Alves. III. Título.

CDU 628.1:631.4(043)

HIGOR COSTA DE BRITO

**RECURSOS HÍDRICOS E IMPACTOS ANTRÓPICOS NO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO: DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL E CENÁRIOS PREDITIVOS**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado no dia 10 de fevereiro de 2021, por banca examinadora composta pelos seguintes membros:



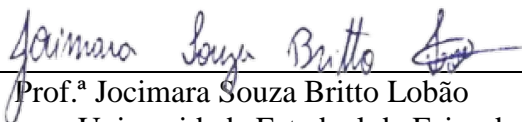
Prof.^a Iana Alexandra Alves Rufino

Orientadora - Unidade Acadêmica de Engenharia Civil - UFCG



Prof. Francisco de Assis de Souza Filho

Examinador externo - Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof.^a Jocimara Souza Britto Lobão

Examinadora externa - Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Campina Grande - PB

2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

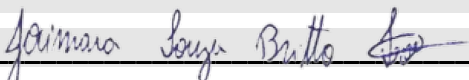
1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, REALIZADA EM 10 DE FEVEREIRO DE 2021**

2. **ALUNO: HIGOR COSTA BRITO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a JOCIMARA SOUZA BRITTO LOBÃO – UEFS – EXAMINADORA EXTERNA, DR. FRANCISCO DE ASSIS DE SOUZA FILHO – UFC – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 03/2020). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “RECURSOS HÍDRICOS E IMPACTOS ANTRÓPICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL E CENÁRIOS PREDITIVOS” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INÍCIO: 09:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O CANDIDATO FOI ARGUIDO ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS DA COMISSÃO, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, ESTE CONCEITO PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O CONCEITO “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 10 DE FEVEREIRO DE 2021**

5.

6. 

7. **JOCIMARA SOUZA BRITTO LOBÃO - EXAMINADORA EXTERNA**

8.

9. 

10. **FRANCISCO DE ASSIS SOUZA FILHO - EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado eletronicamente por **IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/02/2021, às 14:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Higor Costa de Brito, Aluno**, em 10/02/2021, às 14:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 10/02/2021, às 14:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1268543** e o código CRC **FFB6388E**.

Aos meus padrinhos, Maria e Francisco (*in memoriam*), pilares da minha formação como ser humano. Aos meus pais, Elza e Deusdet, que jamais mediram esforços para tornar minha carreira acadêmica um sonho possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter permitido que eu chegasse neste momento da minha vida.

Agradeço a minha família, por todo o amor, apoio e pelos inúmeros esforços para me proporcionar sempre o melhor. Vocês são meu exemplo de luta e determinação, sem a força de vocês eu não conseguiria seguir em frente.

Aos meus queridos amigos do Laboratório de Hidráulica II, meu precioso BU, por tornar o ambiente de trabalho tão agradável e prazeroso. Obrigado por todo o apoio e trocas de conhecimento, jamais esquecerei nossos cafés e confraternizações. Quando lembro de todos os momentos que vivemos, a única certeza que tenho é que viveria tudo outra vez.

A José Benito de Andrade Vieira (*in memoriam*) pelo olhar sereno e ouvidos solidários. Você sempre será um exemplo de esforço e dedicação para mim.

À minha orientadora Iana Alexandra Alves Rufino pela confiança, generosidade e apoio. Espero ter conseguido retribuir, mesmo que de forma ínfima, todos os ensinamentos e oportunidades que me foram concedidos ao longo desses quatro anos de parceria.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial a Leonardo, Jessica, Yáscara e Wanessa, que não se afastaram de mim quando eu me fiz distante, vocês contribuíram valiosamente para esta conquista. Obrigado pelas palavras de apoio, encorajamento, risadas e também puxões de orelha. A vocês minha mais eterna gratidão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

Estudos relacionados aos recursos hídricos, normalmente envolvem inúmeros aspectos, altamente complexos, que evidenciam a carência de uma gestão eficiente e a dificuldade em assegurar o acesso à água para todas as camadas sociais. Esta pesquisa teve como objetivo propor o desenvolvimento de ferramentas de apoio a cenarização e modelagem futura, capazes de expressar o risco da expansão antrópica à segurança hídrica, pautadas em produtos de sensoriamento remoto, compostos por variáveis, atores, processos e tendências de ocupação, com vistas a uma simulação da dinâmica do uso e ocupação do solo na bacia do Alto Curso do Rio Paraíba no Estado da Paraíba. O percurso metodológico ocorreu em três análises distintas. A análise de conflitos verificou os conflitos existentes na área de estudo, através dos programas da Prospectiva e da Teoria do apoio à Decisão (MICMAC e MACTOR). Por outro lado, a análise de tendência observada modelou os processos de antropização que ocorrem na área de estudo, por meio de autômatos celulares. Enquanto a terceira etapa (análise de risco) utilizou os cenários prospectivos (obtidos na etapa anterior), o Índice de Segurança Hídrica do Brasil e o Mapa Cumulativo de Secas (obtido com base no monitor de secas nacional) para analisar os riscos capazes de comprometer a segurança hídrica do Semiárido Brasileiro. Os resultados possibilitaram identificar atores e variáveis-chaves do sistema, além de mapas preditivos do avanço antrópico entre 1986 e 2045, que possibilitaram um ajuste ao Índice de Segurança Hídrica de 2035 e alterou o grau de segurança hídrica de diversas regiões, a partir do risco associado a antropização e eventos de seca. Acredita-se que os resultados gerados nesta pesquisa possam contribuir para um dos principais desafios para a gestão racional dos recursos hídricos, que é fornecer uma abordagem preditiva capaz de auxiliar os planejadores e tomadores de decisão na solução de problemas complexos, capaz de considerar os diversos grupos de interesse que são confrontados por condições incertas em constante mudança.

Palavras-chave: Segurança hídrica; Uso do solo; Cenários preditivos; Autômato celular; Geoprocessamento.

ABSTRACT

Water-related studies involve numerous aspects, many highly complex, highlighting the lack of efficient management and the difficulty of having good water access for everybody. This research proposes tools to support future scenarios and modeling, capable of expressing the risk of human activities growing to water security. All study is based on remote sensing products, composed of variables, actors, processes, and land-use trends. The main idea is to simulate land-use and occupation dynamics in the Upper-Course of the Paraíba River basin. The methodological path follows three different analyzes. First, the conflict analysis verified the study area's existing conflicts through the Prospective and Decision Support Theory programs (MICMAC and MACTOR). Second, the study used CA (Cellular Automata) to observe and model land-use trends and changes and simulate future scenarios. At the same time, the third stage (risk analysis) used the future scenarios (obtained in the previous step), Brazil's Water Security Index, and the Drought Monitor data to analyze the risks capable of compromising water security Brazilian Semiarid Region. The results identified key actors and variables in the system and predictive maps of anthropic growth between 1986 and 2045. Finally, the results enabled an adjustment to the Water Security Index for 2035, including the risk associated with anthropization and drought events. The results generated in this research may contribute to one of the main challenges for water resources management: to provide a predictive approach capable of assisting planners and decision-makers in solving complex problems. It also allows considering the different interest groups confronted by continually changing uncertain conditions.

Keywords: Water security; Land use; Predictive scenarios; Cellular automata; Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de análises realizadas durante a pesquisa.....	17
Figura 2 – Extensão territorial do Semiárido Brasileiro	27
Figura 3 – Localização da Bacia do Alto Curso do Rio Paraíba	30
Figura 4 – O contexto do Alto Paraíba e o PISF no Semiárido Brasileiro.....	32
Figura 5 – Diagrama de influência e dependência entre as variáveis	40
Figura 6 – Diagrama de influência e dependência entre os atores	43
Figura 7 – Diagrama de convergência entre os objetivos dos atores.....	44
Figura 8 – Histograma de implicações dos atores em relação aos seus objetivos.....	44
Figura 9 – Escalas competitivas de acordo com os objetivos da população (a) e latifundiários	45
Figura 10 – Fluxo de trabalho dos procedimentos de modelagem	49
Figura 11 – Classes de MapBiomias reduzidas (reclassificadas) em dois grupos.....	51
Figura 12 – Influência das células vizinhas e função de redução da distância da célula para uma janela móvel 3x3.....	54
Figura 13 – Janela móvel de interpolação suave, determinada automaticamente para a área de estudo	57
Figura 14 – Comparações entre os mapas de LULC simulados e mapas do MapBiomias.....	59
Figura 15 – Simulação de LULC para o ano de 2045, com ênfase no perímetro irrigado ao longo do rio Sucuru para 2018, 2025 e 2035	61
Figura 16 – Avanço da ação antrópica no entorno da área urbana de Monteiro-PB	62
Figura 17 – Porcentagens de antropização, por sub-bacias, na bacia do Alto Curso do Rio Paraíba em 2018 (segundo o MapBiomias) e 2045 (simulado).....	64
Figura 18 – Mapas resultantes da abordagem de seca cumulativa para o Nordeste Brasileiro. Da intensidade mais baixa à mais alta estão: (A) seca severa, (B) seca extrema e (C) seca excepcional.....	70
Figura 19 – Dimensões e indicadores do ISH_{ajust}	71
Figura 20 – Dimensões e ISH_{ajust} para a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba.....	74
Figura 21 – Gráfico de transição entre as classes de segurança hídrica	76
Figura 22 – Diferença entre os graus de segurança hídrica do ISH_{ajust} e ISH	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coleções presentes no GEE usadas com maior frequência.....	24
Tabela 2 – Referencial teórico consultado para elaboração dos componentes do sistema	35
Tabela 3 – Modelo da matriz de influência direta	36
Tabela 4 – Relações de influência entre as variáveis na matriz de influência direta.....	36
Tabela 5 – Relações de influência entre os atores na matriz de influência direta	37
Tabela 6 – Relações de influência na matriz de posição valorizada.....	38
Tabela 7 – Valores e influência e dependência líquida de cada variável.....	39
Tabela 8 – Atores envolvidos e seus respectivos objetivos no sistema	41
Tabela 9 – Escala líquida de influência entre os atores	42
Tabela 10 – Variáveis explicativas e suas premissas.....	52
Tabela 11 – Classes de terreno de relevo reclassificadas em um intervalo (de 0 a 1).....	53
Tabela 12 – Valores de acurácia obtidos a partir da comparação com produtos MapBiomas .	58
Tabela 13 – Quantidade de meses em cada tipologia de seca e seu respectivo grau associado	71
Tabela 14 – Porcentagem de área antropizada e seu respectivo grau associado	72
Tabela 15 – Valor da dimensão de risco em função dos graus de seca e antropização	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
CA	Autômato celular (do inglês, <i>cellular automata</i>)
CNERH	Ministério do Desenvolvimento Regional e Secretarias de Estado
COMB	Comitês de bacia
COMP	Companhias de água
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GEMP	Grandes empresários
GIRH	Gestão integrada de recursos hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INF	Influência dos atores
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
ISH	Índice de Segurança Hídrica
ISH _{ajust}	Índice de Segurança Hídrica Ajustado
LATF	Latifundiários
LULC	Uso e cobertura da terra (do inglês, <i>land use and land cover</i>)
MACTOR	Método de atores, objetivos, relações de força
MDRS	Agência Nacional de Águas
MICMAC	Multiplicação matricial aplicada a uma classificação
MSB	Monitor de Secas do Brasil
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OGE	Órgãos gestores estaduais
PAGRI	Pequenos agricultores
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
POP	População
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SRTM	Missão Topográfica Radar Shuttle (do inglês, <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>)
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	<i>Geral</i>	16
1.2.2	<i>Específicos</i>	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	DISPONIBILIDADE E SEGURANÇA HÍDRICA.....	19
2.2	GESTÃO E CENARIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL.....	20
2.3	MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL.....	21
2.4	A UNIVERSALIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO.....	22
2.4.1	<i>Produtos MapBiomias</i>	25
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
3.1	O SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	27
3.1.1	<i>A bacia do Alto Curso do Rio Paraíba</i>	29
4	O DESAFIO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: MODELO CONCEITUAL NO SUPORTE À CENARIZAÇÃO FUTURA	33
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	33
4.2	METODOLOGIA.....	34
4.2.1	<i>Método MICMAC</i>	36
4.2.2	<i>Método MACTOR</i>	37
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
5	MODELO DE AUTÔMATO CELULAR INTEGRADO A PRODUTOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: ANÁLISE PROSPECTIVA DO AVANÇO ANTRÓPICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	47
5.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	47
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS	49
5.2.1	<i>Visão geral do modelo</i>	49
5.2.2	<i>Modelo de autômato celular SIMLANDER</i>	50
5.2.3	<i>Conjuntos de dados e fatores de influência</i>	50
5.3	REGRAS DE TRANSIÇÃO E CALIBRAÇÃO	55
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
6	SEGURANÇA HÍDRICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: DESAFIOS E RISCOS FUTUROS ...	66
6.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	66
6.2	O ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA DO BRASIL	67
6.3	A ANTROPIZAÇÃO E A SECA COMO INDICADORES DE RISCO.....	68
6.4	ABORDAGEM CUMULATIVA E INTEGRADA DE SECAS PLURIANUAIS.....	69
6.5	METODOLOGIA.....	70
6.6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
6.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	80
7.1	CONCLUSÕES.....	80
7.2	RECOMENDAÇÕES.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO GERAL

A exploração dos recursos naturais, impulsionados pela expansão urbana intensiva e pelo crescimento econômico tem sido um dos grandes desafios para a sustentabilidade global. Nessa perspectiva, a urbanização acelerada e sem a devida ordenação, é um dos grandes catalisadores que contribuem para as mudanças climáticas, além de ser um fator essencial que compromete ecossistemas e suas funcionalidades globais (PARNELL; WALAWEGE, 2011; WU, 2014; YANG et al., 2020).

Apesar do fato de muitas paisagens estarem atualmente em estágios de sucessão após distúrbios antropogênicos, o histórico de mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) são frequentemente desconsiderados em ações voltadas para a restauração e gestão da terra (ELMORE et al., 2006; XU et al., 2010; ZHANG et al., 2005). Nesse contexto, a disponibilidade hídrica pode influenciar significativamente a estrutura, a produtividade e a dinâmica da comunidade nos ecossistemas naturais e de pastagens, além de limitar a restauração, especialmente em regiões semiáridas (CHEN et al., 2007; ZENG et al., 2005).

O estudo e avaliação da situação hídrica envolve diversos aspectos, muitos desses altamente complexos, que evidenciam a carência de uma gestão eficiente e a dificuldade do poder público em assegurar o acesso à água por todas as camadas sociais. O contexto socioeconômico e as incertezas ocasionadas pelo clima, e conseqüentemente pelas mudanças climáticas, acarretam novos desafios que não podem ser enfrentados dentro do paradigma de gestão tradicional, baseado em mecanismos de comando e controle (BATES et al., 2008; MACDONALD, 2010; PAHL-WOSTL et al., 2008).

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores começaram a perceber que os problemas relacionados a água se tornaram multidimensionais, multisetoriais e multirregionais, sendo protagonizados por múltiplos atores motivados por interesses individuais, ocasionando uma nova percepção acerca do que realmente é necessário para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos (BISWAS, 2004; PAHL-WOSTL; MOSTERT; TÀBARA, 2008).

Nessa perspectiva, modelos e métodos capazes de diagnosticar e antecipar o desenvolvimento da sociedade tornam-se substanciais para apoiar e instruir os tomadores de decisão sobre a expansão da ocupação humana e suas consequências sobre os recursos hídricos. Em particular, os modelos de uso e ocupação do solo são extensivamente aplicados por pesquisadores e planejadores para o controle e planejamento da expansão urbana e a proteção do espaço natural (ALNSOUR, 2016; GANT; ROBINSON; FAZAL, 2011; MELLO-THERY; LANDY; ZÉRAH, 2010).

Por conseguinte, um passo importante é espacializar ameaças capazes de comprometer à segurança hídrica e a convivência humana em regiões semiáridas. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo compreender relações de poder e conflitos existentes entre os usuários de água no Semiárido Brasileiro, para que, partindo dessa análise, os atores e variáveis identificados sirvam de dados de entrada para um modelo de autômato celular (CA, do inglês *cellular automata*) integrado a produtos de uso e ocupação do solo. Por fim, os cenários preditivos de uso e ocupação do solo, juntamente com produtos de classificação de seca, são utilizados para representar os riscos associados a segurança hídrica dessa região.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Propor o desenvolvimento de ferramentas de apoio a cenarização e modelagem futura, capazes de representar o risco associado à segurança hídrica, pautadas em produtos de sensoriamento remoto, compostos por variáveis, atores, processos e tendências de ocupação, com vistas a uma simulação da dinâmica do uso e ocupação do solo na bacia do Alto Curso do Rio Paraíba.

1.2.2 Específicos

- Identificar variáveis e atores imprescindíveis para um sistema de gestão de recursos hídricos em uma área semiárida;
- Analisar os conflitos, alianças e relações de poder existentes na região de estudo (representativa da realidade do semiárido);
- Simular o avanço antrópico sobre áreas de formação natural para as próximas décadas, identificando áreas mais susceptíveis à ocupação humana, estimando,

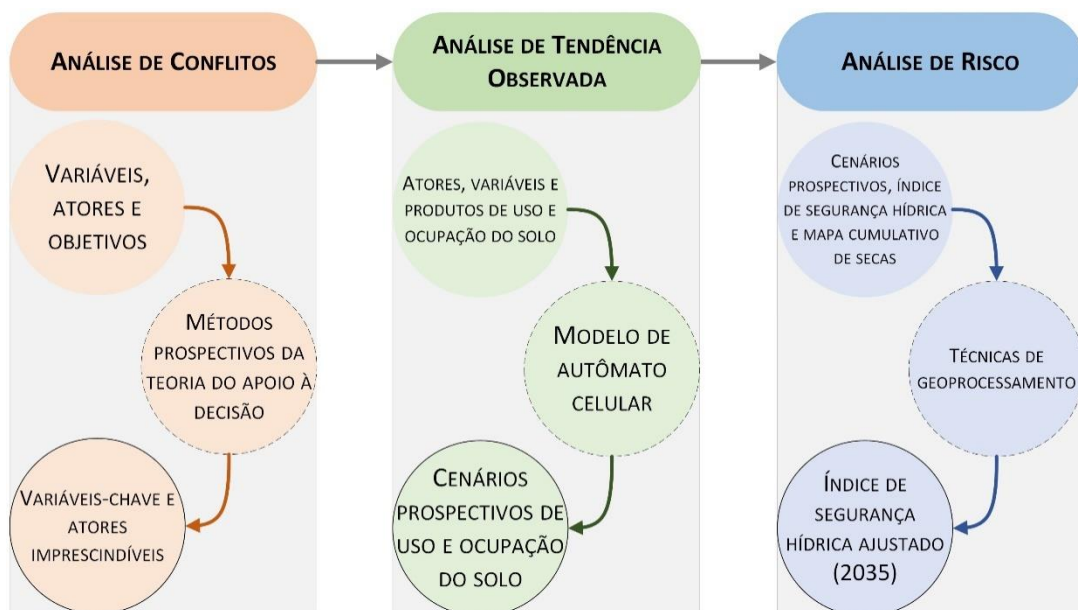
dentre outras coisas, o percentual de área antropizada por sub-bacia para eventuais simulações em modelos hidrológicos concentrados;

- Discutir e analisar as limitações presentes na cenarioização do Índice de Segurança Hídrica para o Semiárido Brasileiro;

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos. O **Capítulo I** refere-se à contextualização geral da pesquisa e seus objetivos, enquanto os **Capítulos II e III** apresentam o referencial teórico e a caracterização da área de estudo, que compreendem o processo de sustentação teórica da pesquisa. Os **Capítulos IV, V e VI** integram as análises realizadas durante a pesquisa, elaboradas em três etapas (Figura 1), e por fim, o **Capítulo VII** apresenta as conclusões do estudo.

Figura 1 – Fluxograma de análises realizadas durante a pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa, correspondente a análise dos conflitos existentes na área de estudo, através de uma modelagem conceitual, resultou em variáveis-chave e atores imprescindíveis ao sistema. A segunda etapa, fez uso dos resultados obtidos na fase anterior para compreender e modelar os processos de antropização que ocorrem na área piloto, por meio de um modelo baseado em CA. Por sua vez, a terceira etapa utilizou os cenários prospectivos (obtidos na etapa

anterior), o Índice de Segurança Hídrica do Brasil (ISH) e o Mapa Cumulativo de Secas para analisar os riscos capazes de comprometer a segurança hídrica do Semiárido Brasileiro.

CAPÍTULO II

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DISPONIBILIDADE E SEGURANÇA HÍDRICA

A disponibilidade hídrica pode ser classificada como a quantidade de água que pode ser usada pela sociedade para seu desenvolvimento, sem danos significativos aos ecossistemas ou outros usuários (VAN ABS, 2013). O termo disponibilidade está intimamente relacionado com a parcela de vazão disponível nos corpos hídricos, e possui condicionantes de variabilidade espaço-temporal (CRUZ; TUCCI, 2008).

Por conseguinte, a disponibilidade hídrica é um dos principais motores da qualidade dos sistemas sociais e ecológicos que vivemos (GAIN; GIUPPONI; WADA, 2016). Entretanto, as interações entre água e humanos são tradicionalmente visualizadas através da escassez de água física, seja ela impulsionada pela demanda (estresse hídrico) ou escassez de água (GUNDA; BENNEYWORTH; BURCHFIELD, 2015).

Segundo Bronstert et al. (2000), a determinação da disponibilidade hídrica em grande escala espacial é um pré-requisito imprescindível para compreender e mitigar os impactos econômicos e sociais de períodos de estiagem. No geral, espera-se que as mudanças climáticas ocasionem à redução da disponibilidade de e um aumento da incerteza na distribuição de água (HIRJI; IBREKK, 2001). Dessa forma, a compreensão dessa combinação de variabilidades e eventos hidrológicos extremos são um ponto chave para solucionar o desafio para alcançar a segurança hídrica.

O termo “segurança hídrica” visa descrever o conceito complexo de gestão holística da água e o equilíbrio entre proteção e uso de recursos, nos níveis locais, regionais e globais. Alcançar essa segurança hídrica indica que cada pessoa possui acesso a água potável, a um custo acessível, para levar uma vida limpa, saudável e produtiva, garantindo um ambiente natural protegido (BOGARDI et al., 2012; GLOBAL WATER PARTNERSHIP, 2000). Em interpretações mais abrangentes, esse conceito considera o bem-estar econômico, a igualdade social e a sustentabilidade ambiental, além dos riscos e incertezas associados à água (GREY; SADOFF, 2007; HOEKSTRA; BUURMAN; VAN GINKEL, 2018).

O emprego generalizado do termo segurança hídrica é relativamente recente e altamente diversificado (LAUTZE; MANTHRITHILAKE, 2012). A segurança hídrica abrange uma estrutura conceitual que articula a necessidade de equilibrar práticas concorrentes de uso do solo e da água, assim como a gestão integrada de recursos hídricos (GIRH). Segundo Cook e Bakker (2012), os desafios da GIRH ecoam como uma advertência de que conceitos amplos são mais úteis para os processos de governança e devem ser reduzidos para facilitar a operacionalização.

2.2 GESTÃO E CENARIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

No final do século passado, o governo brasileiro, diante de alertas sobre a iminente crise de disponibilidade de água, em especial após a realização da Eco 92 no Rio de Janeiro e do Artigo 21 da Constituição Federal de 1988, elaborou medidas com o objetivo de minorar os problemas hídricos existentes. No final do ano de 1996, após uma longa tramitação, o Congresso Nacional aprovou o Projeto de Lei Nacional de Recursos Hídricos, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), sancionada como a Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (MACHADO, 2003).

A Lei n° 9.433, estruturou os recursos hídricos do Brasil a partir de instrumentos legais e institucionais, que serviriam como marco para o ordenamento das questões referentes à disponibilidade e ao uso sustentável das águas. Foram elencados seis instrumentos nessa Política, sendo eles: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos d'água em classes; a outorga de direito de uso; a cobrança pelo uso dos recursos hídricos e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Os fundamentos da Política de Recursos Hídricos determinam, dentre outras considerações, que a gestão dos recursos hídricos deve ser realizada de forma descentralizada, garantindo o uso múltiplo das águas. A descentralização refere-se à adoção da bacia hidrográfica como unidade regional de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, onde os órgãos consultivos e deliberativos que atuam nessas unidades são denominados Comitês de Bacias Hidrográficas (JACOBI; FRANCALANZA, 2005).

Conforme apresentado, o PNRH é um dos instrumentos de gestão implementado através da Lei n° 9.433. Esse instrumento possui um caráter multidisciplinar e participativo, que

engloba uma rede de instituições e possui diversas metas, com o objetivo de melhorar a disponibilidade hídrica, reduzir conflitos pelo uso da água e eventos críticos, além de ações para valorizar a água como bem econômico e social relevante (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2018). Os volumes que compõem o último PNRH, publicado no ano de 2006, apresenta um panorama dos recursos hídricos nacionais e elabora cenários para 2020.

Os cenários contêm elementos que indicam os possíveis riscos e possibilidades para a gestão e a segurança hídrica no país. Ainda, segundo o documento, a principal ameaça provém da possibilidade de junção entre um sistema de gestão ineficiente e uma expansão acelerada das atividades industriais, agrícolas e urbanas, que ocasiona um aumento exponencial na demanda hídrica, fato que compromete a disponibilidade e segurança do recurso (BRITO; SILVA; PORTO, 2007).

Nas políticas brasileiras, o conceito de segurança hídrica foi recentemente capturado pelas autoridades de recursos hídricos do país como um lema para ações do Estado, que serviu para justificar uma série de reformas institucionais e legais da água, no nível federal, desde 2019 (LIBANIO, 2020). Nesse mesmo ano, a Agência Nacional de Águas (ANA) divulgou o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), que passou a ser o instrumento para tomada de decisões acerca do tema.

Os desafios relacionados à segurança hídrica foram quantificados com base no ISH, idealizado para retratar as diferentes dimensões da segurança hídrica. Com base na necessidade de se estabelecer um diagnóstico, tendo em vista o horizonte de planejamento do Plano, o ISH foi elaborado para os anos de 2017 e 2035 (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019a). Ambos utilizaram inúmeros produtos espaciais em sua formulação e se diferenciam pela incorporação das demandas setoriais de uso da água no cenário de 2035.

2.3 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL

Para aprimorar o entendimento acerca dos processos naturais e induzidos pelo homem sobre as mudanças no uso do solo, diversos pesquisadores se concentraram no desenvolvimento de modelos de simulação dinâmica, que buscam prever os possíveis caminhos da evolução para avaliar futuras implicações ecológicas (SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002; STÉPHENNE; LAMBIN, 2001; VERBURG; OVERMARS, 2007). Nesse contexto, a modelagem dinâmica é capaz de transcender as diversas limitações apresentadas pelo

geoprocessamento, historicamente baseado em uma visão estática e bidimensional do planeta (BURROUGH, 1998).

A abordagem de representação da dinâmica espaço-temporal por autômatos celulares (CA) foi introduzida por Von Neuman e Burks (1966), caracterizando um modelo de evolução temporal mais simples, com capacidade de exibir comportamentos complexos. Nos anos subsequentes, Conway (1970) popularizou esses conceitos ao apresentar o Jogo da Vida (*Game of Life*), onde demonstrou que regras muito simples, quando aplicadas repetidamente em estados aleatórios, produzem resultados semelhantes ao mundo real.

No Jogo da Vida, o espaço é representado como uma grade de células, consideradas vivas ou mortas. Partindo de um estado inicial, a cada geração, novas células nascem e algumas morrem. O estado de uma célula é determinado por sua vizinhança que, no caso do Jogo da Vida, é tradicionalmente definida por quatro células adjacentes. Seguindo esse raciocínio, em cada célula de um CA são aplicadas regras de transição. As regras de transição determinam quando e por quais motivos o estado da célula muda, e ainda, se por razões quantitativas ou qualitativas (ALMEIDA et al., 2008). Dessa forma, as regras de transição podem ser definidas como alternativas explicativas para descrever as alterações de cada célula provocadas por alguma influência vizinha.

Atualmente a integração entre produtos de sensoriamento remoto e modelos dinâmicos espaciais utilizados em análises urbanas e ambientais permitem avaliar de forma quantitativa a estruturação e a dinâmica antrópica sobre os recursos naturais, proporcionando uma melhor visualização da realidade urbana e dos elementos responsáveis pelas suas transformações espaço-temporais (GIDEY et al., 2017; KAMUSOKO, 2017; KANTAKUMAR; KUMAR; SCHNEIDER, 2019; RIMAL et al., 2018).

2.4 A UNIVERSALIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto pode ser descrito como a tecnologia capaz de obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre por meio de sensores instalados em equipamentos distantes, ou seja, sem o contato físico entre o sensor e o objeto em análise (FLORENZANO, 2007). Para Short (1976) a era do sensoriamento remoto via satélite terrestre foi inaugurada em julho de 1972, com o lançamento do primeiro Landsat (então denominado *Earth Resources*

Technology Satellite, ou ERTS), pioneiro no uso de plataformas espaciais para coleta sistemática de imagens de terras.

Ao longo da trajetória do Programa Landsat, o alto custo para o acesso às imagens sempre limitaram a capacidade da comunidade acadêmica de estudar o planeta e o modo como ele está mudando. Entretanto, em uma iniciativa piloto entre o USGS (*United States Geological Survey*) e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) no ano de 2008, todos os dados do Landsat mantidos pelo USGS foram disponibilizados gratuitamente na internet para qualquer usuário interessado (WOODCOCK et al., 2008). A partir da iniciativa, houve aumentos substanciais nos *downloads* de imagens do Landsat, acarretando em uma rápida expansão de aplicações científicas e operacionais de interesse do governo, setor privado e sociedade civil, tornando-se um exemplo para as agências espaciais em todo o mundo sobre o valor do acesso livre aos dados de observação da Terra (WULDER et al., 2012; ZHU et al., 2019).

Os avanços na visualização e na computação em nuvem estão revolucionando o sensoriamento remoto na última década. Plataformas gratuitas de processamento como *NASA Earth Exchange* e *Google Earth Engine* (GEE) podem lidar com grandes volumes de dados geoespaciais e detectados remotamente, o que possibilita aos usuários utilizar algoritmos para grandes conjuntos de dados, sem grandes esforços de armazenamento e processamento (CHEN et al., 2017; EVANGELIDIS et al., 2014; GUO; WANG; LIANG, 2016; HUANG et al., 2017; WULDER; COOPS, 2014; XIONG et al., 2017).

Dessa forma, é possível afirmar que a disseminação de produtos de sensoriamento remoto ganhou ainda mais força com a computação em nuvem. O catálogo de dados públicos do GEE (Tabela 1), por exemplo, é uma coleção com vários *petabytes* de conjuntos de dados geoespaciais, composta por imagens de sensoriamento remoto que observam a Terra (GORELICK et al., 2017). O catálogo inclui todos os arquivos dos satélites Landsat (5, 7 e 8), Sentinel-1 e Sentinel-2, além de previsões climáticas, dados de cobertura do solo e muitos outros conjuntos de dados ambientais, geofísicos e socioeconômicos.

Tabela 1 – Coleções presentes no GEE usadas com maior frequência

Coleção	Resolução Espacial	Cobertura Temporal	Cobertura Espacial
Landsat			
Landsat 8 OLI/TIRS	30 m	2013–Atual	Global
Landsat 7 ETM+	30 m	2000–Atual	Global
Landsat 5 TM	30 m	1984–2012	Global
Landsat 4–8 surface reflectance	30 m	1984–Atual	Global
Sentinel			
Sentinel 1 A/B ground range detected	10 m	2014–Atual	Global
Sentinel 2A MSI	10/20 m	2015–Atual	Global
MODIS			
MOD08 atmosphere	1°	2000–Atual	Global
MOD09 surface reflectance	500 m	2000–Atual	Global
MOD10 sActual cover	500 m	2000–Atual	Global
MOD11 temperature and emissivity	1000 m	2000–Atual	Global
MCD12 Land cover	500 m	2000–Atual	Global
MOD13 Vegetation indices	500/250 m	2000–Atual	Global
MOD14 Thermal anomalies & fire	1000 m	2000–Atual	Global
MCD15 Leaf area	500 m	2000–Atual	Global
MOD17 Gross primary productivity	500 m	2000–Atual	Global
MCD43 BRDF-adjusted reflectance	1000/500 m	2000–Atual	Global
MOD44 veg. cover conversion	250 m	2000–Atual	Global
MCD45 thermal anomalies and fire	500 m	2000–Atual	Global
ASTER			
L1 T radiance	15/30/90 m	2000–Atual	Global
Global emissivity	100 m	2000–2010	Global
Outras imagens			
PROBA-V top of canopy reflectance	100/300 m	2013–Atual	Global
EO-1 hyperion hyperspectral radiance	30 m	2001–Atual	Global
DMSP-OLS nighttime lights	1 km	1992–2013	Global
USDA NAIP aerial imagery	1 m	2003–2015	Estados Unidos contíguos
Topografia			
Shuttle Radar Topography Mission	30 m	2000	60°N–54°S
USGS National Elevation Dataset	10 m	Múltipla	Estados Unidos
USGS GMTED2010	7.5"	Múltipla	83°N–57°S
GTOPO30	30"	Múltipla	Global
ETOPO1	1'	Múltipla	Global
Cobertura da terra			
GlobCover	300 m	2009	90°N–65°S
USGS National Landcover Database	30 m	1992–2011	Estados Unidos contíguos
UMD global forest change	30 m	2000–2014	80°N–57°S
JRC global surface water	30 m	1984–2015	78°N–60°S
GLCF tree cover	30 m	2000–2010	Global
USDA NASS cropland data layer	30 m	1997–2015	Estados Unidos contíguos
Clima, precipitação e atmosfera			
Global precipitation measurement	6'	2014–Atual	Global
TRMM 3B42 precipitation	15'	1998–2015	50°N–50°S
CHIRPS precipitation	3'	1981–Atual	50°N–50°S
NLDAS-2	7.5'	1979–Atual	América do Norte
GLDAS-2	15'	1948–2010	Global
NCEP reanalysis	2.5°	1948–Atual	Global
ORNL DAYMET weather	1 km	1980–Atual	América do Norte
GRIDMET	4 km	1979–Atual	Estados Unidos contíguos
NCEP global forecast system	15'	2015–Atual	Global
NCEP climate forecast system	12'	1979–Atual	Global
WorldClim	30"	1960–1990	Global
NEX downscaled climate projections	1 km	1950–2099	América do Norte
População			
WorldPop	100 m	Múltipla	2010–2015
GPWv4	30"	2000–2020	85°N–60°S

Fonte: Adaptado de Gorelick et al. (2017).

Estudos recentes destacam a dinâmica e as consequências das atividades humanas no planeta e apontam uma fonte importante de mudanças nos sistemas terrestres (FANG et al.,

2019; KHORRAM et al., 2016; MADIN et al., 2016; SCHULZE et al., 2018; TANG; OKI, 2016). Portanto, é claramente necessária a utilização de produtos de sensoriamento remoto para um entendimento integrado de como os vários elementos do sistema terrestre (clima, hidrologia, processos biosféricos e atividades humanas) interagem para produzir condições ambientais (WILLIAMS; GOWARD; ARVIDSON, 2006).

2.4.1 Produtos MapBiomias

No Brasil, dados espaciais sobre as trajetórias históricas de LULC são fundamentais para informar o planejamento e a gestão sustentável dos recursos naturais, formulação de políticas, entre outras aplicações sociais (SOUZA et al., 2020). Nesse âmbito, nasceu o Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias). O projeto, lançado em julho de 2015, teve o objetivo de contribuir para o entendimento da dinâmica do uso e da cobertura da terra no Brasil e baseia-se no processamento digital de imagens Landsat abrangendo os anos de 1985 a 2018 (SOUZA JUNIOR; AZEVEDO, 2019). A iniciativa é multi-institucional e envolve universidades, organizações não governamentais e empresas de tecnologia, que promove o mapeamento anual de cobertura e uso da terra do Brasil nas últimas três décadas.

A partir da coleção Landsat disponível no GEE e com algoritmos de aprendizado de máquina (AZZARI; LOBELL, 2017), o MapBiomias reconstruiu a classificação de LULC anual com resolução espacial de 30 metros entre 1985 e 2018. A computação em nuvem permitiu o processamento rápido e automático de um grande conjunto de imagens, abrangendo todo o território brasileiro. Conforme relatado por Souza et al. (2020), o projeto reconstruiu as séries temporais anuais de mapas LULC a partir da combinação de dados Landsat, GEE, aprendizado de máquina e uma rede de especialistas locais, em um conceito de LULC em evolução progressiva.

Desde sua primeira coleção, publicada em 2016, o MapBiomias vem ganhando força e alcançando novos usuários. Os produtos de LULC do MapBiomias estão sendo utilizados em diversas pesquisas (CROUZEILLES et al., 2019; PAIVA et al., 2019; RUFINO et al., 2021; VIDAL et al., 2019). Além disso, diferentes órgãos (governamentais e não-governamentais) brasileiros passaram a utilizar os mapas e produtos fornecidos pelo MapBiomias para auxiliar

no monitoramento ambiental, em políticas públicas e na conservação dos recursos naturais (ROSA; SHIMBO; AZEVEDO, 2019).

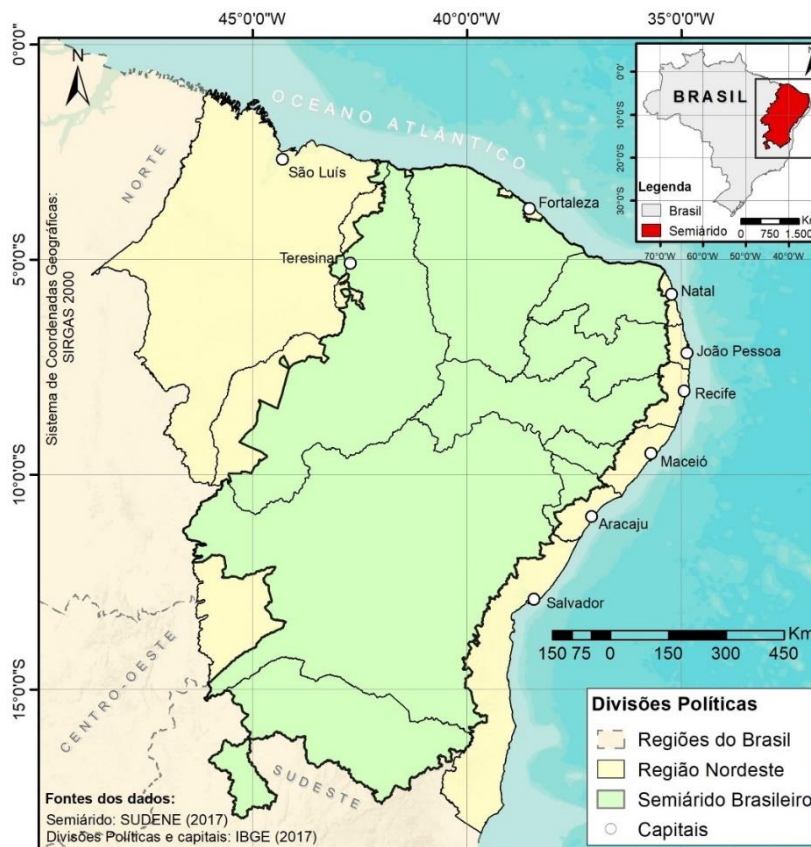
CAPÍTULO III

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

A região semiárida do Brasil (Figura 2) abrange uma área de 1.127.953 km² e comporta 1.262 municípios com, aproximadamente, 27 milhões de habitantes (INSA, 2017). A história dessa região está intimamente relacionada a ocorrência de secas, desastre que causa, dentre outras coisas, desemprego, fome, pobreza, e historicamente a migração interna de pessoas pelo país. O regime hidrológico da região é marcado por eventos extremos, chuvas torrenciais e secas severas (MEDEIROS et al., 2015). Em virtude da irregularidade das chuvas e aos baixos índices pluviométricos, grande parte da região enfrenta um problema crônico de falta de água, que dificulta o desenvolvimento de atividades agrícolas e industriais.

Figura 2 – Extensão territorial do Semiárido Brasileiro



Fonte: Elaborado pelo autor.

A competência para delimitar os critérios de delimitação do semiárido foi dada ao Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), pela Lei Complementar nº 125, de 3 de janeiro de 2007. Os critérios adotados para a delimitação da área foram a precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800mm, o percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60% e o Índice de Aridez de Thornthwaite¹ igual ou inferior a 0,5 (SUDENE, 2020).

Segundo Silva e Bezerra (2020), as relações de poder e agentes políticos moldaram a nova regionalização estabelecida para o semiárido, onde diversas áreas que não possuem características naturais do semiárido foram contempladas. Tal constatação denuncia a influência de grupos econômicos de poder. Dessa forma, conforme apresentado em outros estudos, a delimitação política do semiárido não se refere necessariamente e restritamente aos locais de clima semiárido (ANDRADE; NUNES, 2014; LOBÃO; FRANCA ROCHA; FREITAS, 2014).

Embora possua uma delimitação controversa, grande parte dos municípios da região apresentam carência de sistemas eficientes para o armazenamento da água, onde a capacidade de reserva doméstica está diretamente ligada as condições financeiras dos usuários, o que intensifica ainda mais os problemas sociais. Ciclos de fortes estiagens, secas e enchentes, atingem sazonalmente a região em intensidades e intervalos variáveis, podendo durar anos ou até décadas (SILVA et al., 2010). Nesse contexto, a comunidade científica vem integrando as questões referentes a mudanças climáticas no Semiárido Brasileiro a dados de biodiversidade e desertificação. Dessa forma, as pesquisas visam o desenvolvimento sustentável da região diante às mudanças climáticas, ao processo de desertificação e valoração e preservação da biodiversidade (ANGELOTTI; SIGNOR; GIONGO, 2015).

Do ponto de vista econômico, no início deste século houve uma considerável mudança nos padrões de consumo, com uma maior diversificação da produção e das fontes de geração de emprego e renda (BURSZTYN; CHACON, 2011). Além disso, o intenso processo de urbanização que ocorre a nível nacional, continuou ocorrendo na região nas últimas quatro décadas, evidenciando novas relações de poder, tanto no meio urbano, como no meio rural, e entre esses dois espaços em busca da garantia pelo uso da água.

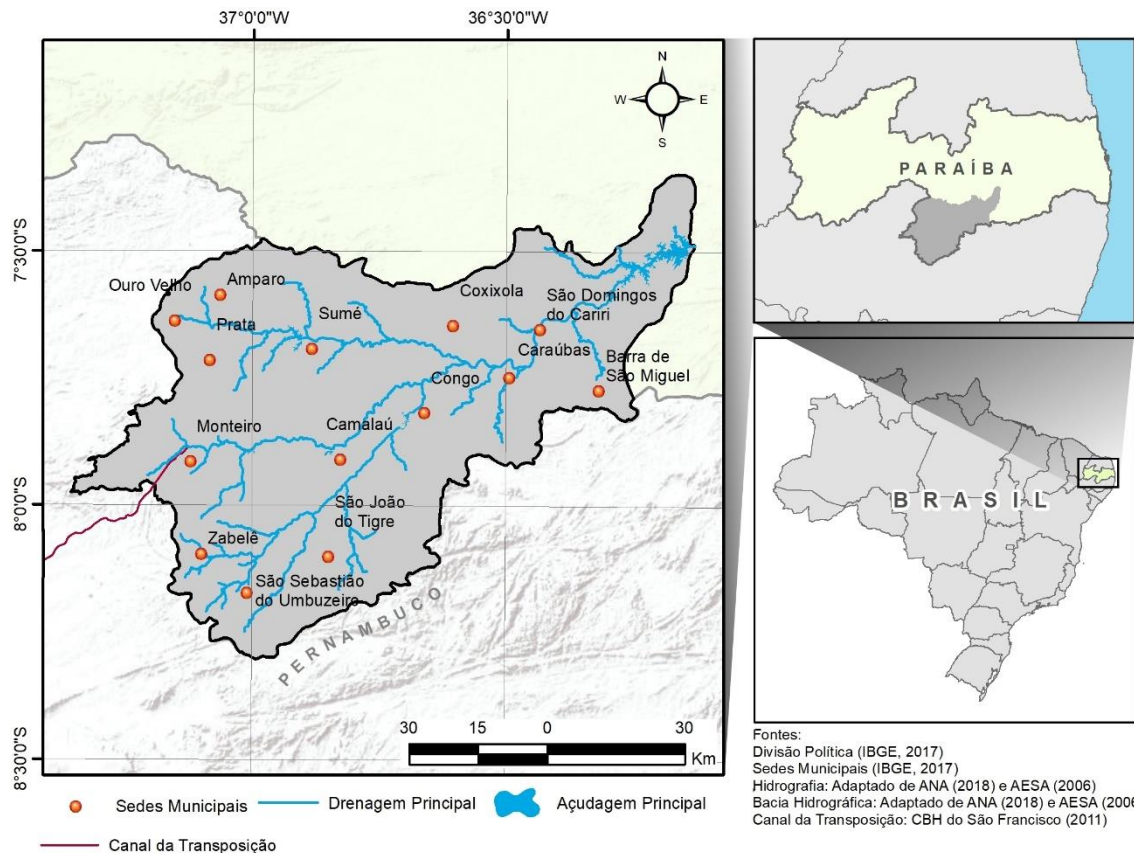
¹ O Índice de Aridez de Thornthwaite é utilizado para medir o grau de aridez (seca, desertificação). É obtido a partir de relação entre o potencial hídrico, quantidade de água da chuva, e a taxa de evaporação e transpiração potencial.

A situação de escassez de água na região semiárida, leva à necessidade da gestão múltipla, para isso a prática política conservadora não deve perdurar na sociedade, uma vez que a população deve reconhecer que a água é um bem público e que, portanto, o seu gerenciamento compartilhado deverá garantir a democratização de seus usos e a sua preservação, condição indispensável para o progresso da região (GARJULLI, 2003). Dessa maneira, os Comitês de Bacia nessa região tornam-se estratégicos no processo de intervenção social. São eles que devem estabelecer os usos prioritários das águas em suas bacias, discutir sobre a transposição de águas, sobre a cobrança de água bruta, além dos destinos dos recursos arrecadados, em uma região marcada por chuvas irregulares e secas severas.

3.1.1 A bacia do Alto Curso do Rio Paraíba

O Alto Curso do Rio Paraíba (Figura 3) localiza-se na porção sul do estado da Paraíba, na divisa com o estado de Pernambuco, na região Nordeste do Brasil. A bacia abrange uma área de aproximadamente 6.696,17 km², e engloba a área de 18 municípios, alguns deles de forma parcial. Esses municípios encontram-se distribuídos entre as microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental do Estado, uma das regiões com índices pluviométricos mais baixos do país (FURTADO; SOUZA, 2016). O rio Paraíba recebe contribuições pouco expressivas de seus afluentes salobros, recebendo mais água das chuvas do regime torrencial, como caracterizado na maior parte da região semiárida.

Figura 3 – Localização da Bacia do Alto Curso do Rio Paraíba



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse regime condicionou uma vegetação do tipo caatinga, havendo em suas vertentes espécies arbóreas de grande porte, típicas de mata úmida, que, com o avanço da atividade agrícola, foram dando lugar à predominância da caatinga propriamente dita. Segundo a Organização Não Governamental Para'íwa:

Nas margens do rio, onde havia árvores de grande porte, a agropecuária as eliminou, contribuindo assim para o assoreamento do leito do rio e para os problemas ambientais, quais sejam o desmatamento e a compactação do solo pelo pisoteio do gado, cuja consequência vem sendo a gradativa diminuição da vazão de água no leito do rio. Tais práticas agropecuárias têm sido responsáveis pelo processo de degradação ambiental, que dentre outras coisas, vem diminuindo as nascentes perenes que alimentam a bacia do rio Paraíba. Não obstante, são práticas culturais incorporadas ao imaginário sertanejo, que dificultam muito a solução dos problemas ambientais (MAIA JÚNIOR et al., 2011, não paginado).

Nessa região, os conflitos pelo uso de recursos naturais não se limitam apenas aos custos e medidas de compartilhamento de recursos, as divergências surgem associadas a aspectos socioculturais, políticos e medidas de gerenciamento, historicamente agravados por fenômenos de secas. Dentre os casos de secas recentes, tem-se a seca plurianual de 2012 a 2017.

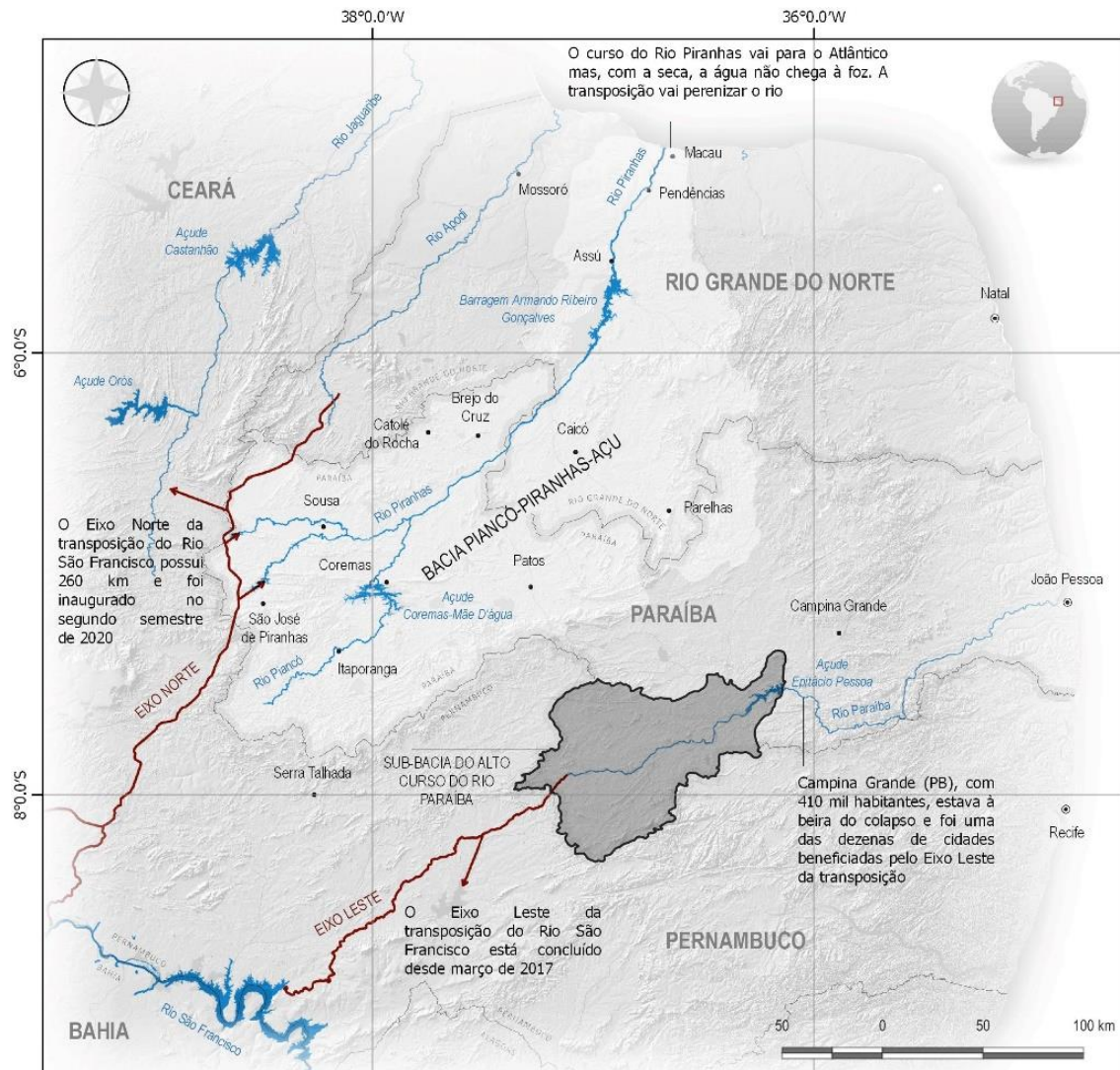
Considerada a maior seca já registrada na região semiárida, o período de estiagem ocasionou impactos substanciais à população, onde inúmeros açudes entraram em colapso, com volumes zerados; diversos municípios passaram a ser abastecidos por carros-pipa; a irrigação foi proibida em muitas regiões e a agropecuária apresentou perdas críticas (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016).

Diante do iminente colapso de abastecimento na Paraíba, o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) teve suas obras aceleradas para apresentar-se como alternativa ao abastecimento de diversas cidades, que tem como fonte principal de abastecimento de água os reservatórios da bacia do Alto Paraíba (Figura 4). A obra envolve e conecta bacias do Nordeste Setentrional em dois eixos de ligação, o eixo Norte e o eixo Leste (BRASIL, 2004).

O eixo Leste foi concluído em março de 2017 com o intuito de garantir a segurança hídrica do estado da Paraíba. A obra, composta por várias estações de bombeamento, aquedutos, túneis e reservatórios de pequeno porte, possui um desnível de 304 m ao longo do trecho. As águas do São Francisco percorrem 220 km de canal até desaguar na calha do rio Paraíba, no município de Monteiro (região sudoeste do Alto Paraíba), tornando-se responsável pela manutenção dos níveis de vários açudes do Cariri paraibano, inclusive do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), que abastece o município de Campina Grande (segunda cidade mais populosa do Estado) e dezoito cidades circunvizinhas (CORREIA, 2019).

Neste sentido, esta importante bacia hidrográfica é utilizada nesta pesquisa como área de estudo tanto pela sua representatividade para o semiárido como um todo, quanto pela alta aplicabilidade dos conceitos e técnicas tratados nesta dissertação. Esta é uma bacia submetida a pressões de diversas origens e de importância estratégica para medidas de adaptação e gestão dos recursos hídricos da região ao longo de décadas.

Figura 4 – O contexto do Alto Paraíba e o PISF no Semiárido Brasileiro



Fonte: Adaptado de Maisonnave e Prado (2018).

CAPÍTULO IV

4 O DESAFIO DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: MODELO CONCEITUAL NO SUPORTE À CENARIZAÇÃO FUTURA

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O estudo e avaliação da situação hídrica envolve diversos aspectos, muitos desses altamente complexos, que evidenciam a carência de uma gestão eficiente e a dificuldade do poder público em assegurar o acesso à água por todas as camadas sociais. As variações socioeconômicas e as incertezas ocasionadas pelo clima e conseqüentemente pelas mudanças climáticas acarretam novos desafios que não podem ser enfrentados dentro do paradigma de gestão tradicional, baseado em mecanismos de comando e controle (BATES et al., 2008; MACDONALD, 2010; PAHL-WOSTL et al., 2008).

A estruturação de uma GIRH e preditiva das águas torna-se factível a partir de uma organização institucional e legislação apropriada, aliada a um suporte tecnológico que monitore e promova avanços substanciais na bacia hidrográfica (TUNDISI, 2006). A água deve ser analisada de forma holística, com o intuito de gerenciá-la entre todos os setores e considerar todas as etapas de uso, garantindo uma participação descentralizada na tomada de decisões (CURRY et al., 2014; VILJOEN, 2010). Em suma, faz-se necessário cessar abordagens do gerenciamento da água fragmentadas e decisões de desenvolvimento precipitadas e exageradas (GIORDANO; SHAH, 2014).

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores começaram a perceber que os problemas relacionados a água se tornaram multidimensionais, multisetoriais e multirregionais, sendo protagonizados por múltiplos atores motivados por interesses individuais, ocasionando uma nova percepção acerca do que realmente é necessário para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos (LIU et al., 2020; PAHL-WOSTL; MOSTERT; TÀBARA, 2008; ROMANO, 2019; ZHANG et al., 2016). Uma diferença fundamental entre sistemas tradicionais e sustentáveis é a preocupação com possíveis mudanças, sejam elas nas demandas da sociedade, no suprimento de água ou no próprio sistema decorrente do envelhecimento (PLATE, 1993).

A água está intrinsecamente associada a capacidade de desenvolver medidas sustentáveis para o meio ambiente e a sociedade, tornando uma visão de longo prazo necessária

para explicar o desenrolar de alguns processos hidrológicos e sociais, associados ao tempo necessário para que todos os investimentos econômicos gerem resultados (GALLOPÍN, 2000).

Diante os impactos ocasionados pela evolução da sociedade e consequente antropização da terra, surgem novas abordagens integrativas que modelam não apenas os fatores estritamente hidrológicos, mas também levam em consideração os impactos desses fatores externos combinados, uma vez que eles atuam em conjunto e comprometem a segurança hídrica. Portanto, este capítulo realiza uma abordagem conceitual que serve como base para a estruturação de variáveis, atores e hipóteses que influenciam, direta e indiretamente, a modelagem de cenários futuros de disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro.

4.2 METODOLOGIA

A etapa inicial para a realização do estudo é a realização de um levantamento bibliográfico (Tabela 2), com o intuito de estruturar, de forma simplificada, as variáveis e os atores que influenciam de forma significativa os impactos do uso do solo sobre os recursos na região semiárida do Brasil. As variáveis e os atores serão listados e posteriormente submetidos aos métodos MICMAC (Multiplicação matricial aplicada a uma classificação) e MACTOR (Método de atores, objetivos, relações de força), respectivamente, em softwares homônimos desenvolvidos pelos franceses Godet e Lesourne (1977).

Tabela 2 – Referencial teórico consultado para elaboração dos componentes do sistema

	Componente	Fontes consultadas
Variáveis	Acesso à Água	(ARAÚJO et al., 2004; BEZERRA, 2002; CIRILO, 2008; FOLHES; RENNÓ; SOARES, 2009; GAISER et al., 2003; GUIMARÃES JR, 2016; SILVA et al., 2010; VIEIRA, 2002, 2003)
	Uso e Ocupação do Solo	(BRASILEIRO, 2009; CIRILO, 2008; GAISER et al., 2003; MILHORANCE et al., 2019; MONTENEGRO; RAGAB, 2010, 2012; SILVA; CUNHA; LOPES, 2019)
	Sociedade e Qualidade de Vida	(BEZERRA, 2002; GAISER et al., 2003; KROL et al., 2001; MILHORANCE et al., 2019; RIBOT; MAGALHÃES; PANAGIDES, 2005; ROCHA; SOARES, 2015)
	Características Culturais	(CARVALHO; ESPINDULA, 2014; GAISER et al., 2003; VIEIRA, 2002, 2003)
	Crescimento Econômico	(BEZERRA, 2002; FOLHES; RENNÓ; SOARES, 2009; GAISER et al., 2003; GUIMARÃES JR, 2016; SILVA et al., 2010)
	Desempenho Industrial	(ARAÚJO et al., 2004; GUIMARÃES JR, 2016)
	Agricultura e Pecuária	(BRASILEIRO, 2009; CIRILO, 2008; FOLHES; RENNÓ; SOARES, 2009; GAISER et al., 2003; KROL et al., 2001; SILVA et al., 2010)
	Legislação	(CIRILO, 2008; GUIMARÃES JR, 2016; MILHORANCE et al., 2019; SILVA et al., 2010; VIEIRA, 2002, 2003)
	Gestão e Governança	(ARAÚJO et al., 2004; CARVALHO; ESPINDULA, 2014; CIRILO, 2008; FOLHES; RENNÓ; SOARES, 2009; GUIMARÃES JR, 2016; GUIMARÃES JR, 2016; MILHORANCE et al., 2019; SILVA; CUNHA; LOPES, 2019)
	Reposta a Eventos Extremos	(ARAÚJO et al., 2004; BEZERRA, 2002; BRASILEIRO, 2009; CIRILO, 2008; GAISER et al., 2003; MILHORANCE et al., 2019; RIBOT; MAGALHÃES; PANAGIDES, 2005)
	Infraestrutura Hídrica	(CARVALHO; ESPINDULA, 2014; CIRILO, 2008; GUIMARÃES JR, 2016; ROCHA; SOARES, 2015; VIEIRA, 2002, 2003)
Atores e objetivos	População	(BEZERRA, 2019; AZEVEDO, 2012; GARFÍ et al., 2011; SILVA et al., 2015; SOUSA; ARAÚJO; DE LIMA, 2018)
	Pequenos Agricultores	(BEZERRA, 2019; ANDRADE; SOUZA; SILVA, 2013; LEMOS; OLIVEIRA, 2004; PONTES et al., 2013; SABOURIN, 1999; SANTOS, 2016; SILVA et al., 2015; SOUSA; ARAÚJO; DE LIMA, 2018)
	Latifundiários	(LEMOS; OLIVEIRA, 2004; PONTES et al., 2013; SABOURIN, 1999; SANTOS, 2016; SOUSA; ARAÚJO; DE LIMA, 2018)
	Companhias de Água	(BEZERRA, 2019; LEMOS; OLIVEIRA, 2004; SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017)
	Agência Nacional de Águas	(BEZERRA, 2019; LEMOS; OLIVEIRA, 2004; SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017)
	Ministério do Desenvolvimento Regional e Secretarias de Estado	(BEZERRA, 2019; SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017)
	Conselhos Nacionais e Estaduais de RH	(BEZERRA, 2019; LEMOS; OLIVEIRA, 2004; SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017; SOBRAL, 2011)
	Comitês de Bacia	(BEZERRA, 2019; AZEVEDO, 2012; LEMOS; OLIVEIRA, 2004; SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017)
	Órgãos Gestores Estaduais	(BEZERRA, 2019; SILVA; RIBEIRO; MIRANDA, 2017; SOBRAL, 2011)
	Grandes Empresários	(PONTES et al., 2013; SABOURIN, 1999; SANTOS, 2016; SILVA et al., 2015)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Método MICMAC

Este método consiste em identificar as variáveis chave, ou seja, as variáveis essenciais ao progresso do sistema. Esta identificação é feita, primeiramente, através de uma classificação denominada matriz de influência direta (GODET; DURANCE, 2011), onde o controlador lista quantas variáveis julgar necessárias, relacionando-as através de múltiplos cruzamentos, conforme ilustrado na Tabela 3. O preenchimento da matriz foi realizado pelo autor e levou em consideração o levantamento bibliográfico e conhecimentos prévios de outros autores acerca do assunto. Por sua vez, a diagonal principal que corresponde a relação entre um par de variáveis iguais, é preenchida com valor nulo. Para cada par de variáveis distintas, os índices são preenchidos a partir da análise da influência exercida por uma variável da primeira coluna sobre as variáveis da primeira linha, obedecendo a numeração presente na Tabela 4.

Tabela 3 – Modelo da matriz de influência direta

Variáveis	Variável 1	Variável 2	Variável 3	Variável 4
Variável 1	0			
Variável 2		0		
Variável 3			0	
Variável 4				0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Relações de influência entre as variáveis na matriz de influência direta

Numeração	Tipo de Influência
0	Sem influência
1	Influência fraca
2	Influência moderada
3	Influência alta

Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, é avaliada a variável mais influente e dependente do sistema. Essa influência é calculada a partir da soma dos índices contidos em cada linha da matriz quadrada, enquanto a dependência é calculada pela soma dos índices de cada coluna.

Por fim, obtém-se o diagrama de influência e dependência, dividido em quatro quadrantes, sendo estruturado com base na dependência e influência das variáveis, onde a localização dentro do diagrama indica o seu tipo de relação, cada uma representando um determinado perfil: o 1º quadrante englobou variáveis de mudança, essas exercem forte influência e possuem grande dependência; o 2º quadrante representou variáveis que regem o

futuro, essas possuem forte influência e baixa ou nenhuma dependência; o 3º quadrante exibiu as variáveis pouco relevantes, que possuem pouca ou nenhuma relação de influência e dependência no sistema, podendo ser desconsideradas para esse tipo de análise; o 4º quadrante representou variáveis de resposta, essas apresentam forte dependência e pouca ou nenhuma influência.

4.2.2 Método MACTOR

O método MACTOR tem o intuito de analisar o jogo de alianças e possíveis conflitos entre os atores envolvidos no sistema (GODET; DURANCE, 2011). Cada ator é definido em função dos seus objetivos, problemas e meios de ação a partir dos perfis traçados nas fontes consultadas (Tabela 5). Em seguida, examina-se o posicionamento dos atores em relação aos demais componentes do sistema. A primeira etapa da estruturação do método compreende a fase de construção do quadro das estratégias dos atores, esse quadro diz respeito aos atores que comandam as variáveis chave identificadas pelo método MICMAC.

A segunda fase do processo pode ser entendida como a avaliação das relações de poder entre os atores, através da elaboração da matriz de influência direta, construída a partir do quadro de estratégias de atores, elaborado na fase anterior. Nessa etapa, as relações de poder são calculadas tendo em vista os meios de ação diretos e indiretos, onde um ator pode agir sobre outro por intermédio de um terceiro. A matriz é preenchida de forma análoga ao método MICMAC, entretanto os índices são numericamente associados conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Relações de influência entre os atores na matriz de influência direta

Numeração	Tipo de Influência
0	O ator tem pouca ou nenhuma influência sobre o outro
1	O ator pode interferir de forma limitada os processos operatórios de gestão do outro ator
2	O ator pode interferir na realização dos projetos do outro ator
3	O ator pode influenciar o cumprimento dos objetivos do outro ator
4	O ator pode ameaçar a existência do outro ator

Fonte: Elaborado pelo autor.

A última fase do processo é hierarquização das prioridades no que diz respeito aos objetivos de cada ator, para tanto é elaborada a matriz de posição valorizada. Nesta matriz, faz-

se necessário uma análise dos atores em função dos seus objetivos finais, dos seus projetos e meios de ação, dessa forma, a matriz é preenchida conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Relações de influência na matriz de posição valorizada

Numeração	Tipo de Influência
-4	O objetivo do ator prejudica a existência dos objetivos do outro ator
-3	O objetivo do ator compromete a realização da missão objetivada pelo outro ator
-2	O objetivo do ator põe em risco o sucesso dos projetos objetivados pelo outro ator
-1	O objetivo do ator põe em risco os procedimentos operacionais objetivados pelo outro ator
0	O objetivo do ator tem um resultado incerto em relação ao objetivo do outro ator
1	O objetivo do ator é essencial os procedimentos operacionais objetivados pelo outro ator
2	O objetivo do ator é essencial para o sucesso dos projetos objetivados pelo outro ator
3	O objetivo do ator é indispensável para a realização da missão objetivada pelo outro ator
4	O objetivo do ator é indispensável para a existência dos objetivos do outro ator

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez completada a entrada de dados no sistema, é então gerado o gráfico de influência e dependência entre os atores a partir da matriz de influência direta. Por sua vez, o método calcula a matriz de influência direta e indireta contendo, para cada par de atores, a influência direta mais todas as influências indiretas, considerando cada ator intermediário, conforme a Equação 1.

$$MDII_{ij} = MDI_{ij} + \sum_k (\min(MDI_{ik}, MDI_{kj})) \quad (1)$$

Onde: MDII = matriz de influência direta e indireta;

MDI = matriz de influência direta;

A próximo produto calculado pelo método é a escala líquida de influência direta e indireta. Essa escala mede, para cada par de atores, a distância entre a influência direta e indireta. Cada ator exerce (e recebe) influências diretas e indiretas de 2ª ordem de cada ator. A escala de influência líquida indica, para cada par de atores, a influência excedente exercida ou recebida. Onde um valor positivo indica que determinado ator tem mais influência direta e indireta sobre outro ator. A lógica é oposta quando a escala tem um sinal negativo.

O gráfico de influência e de dependência revela quatro posições: o 1º quadrante é composto pelos atores de ligação, esses são tão influentes quanto dependentes; o 2º quadrante engloba os atores dominantes, que são muito influentes e pouco dependentes; o 3º quadrante é

formado pelos atores autônomos, estes não são influentes e são independentes ao sistema estudado; o 4º quadrante é composto pelos atores dominados, estes são pouco influentes e muito dependentes.

Por sua vez, a matriz de posição valorizada proporcionou a elaboração do gráfico de convergência entre os atores, além de um histograma de implicações dos atores em relação aos seus objetivos e a geração de uma escala competitiva por objetivo, capaz de identificar atores favoráveis e contrários aos objetivos do sistema.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis escolhidas e suas respectivas influências e dependências, com base na matriz de influência direta, podem ser visualizadas na Tabela 7. Ao analisar os dados, temos como variáveis mais influentes a legislação e as medidas de gestão e governança, por outro lado, a variável de sociedade e qualidade de vida apresenta-se como a mais dependente do sistema. Por sua vez, o acesso à água apresenta-se como uma variável altamente influente e dependente dentro do sistema.

Tabela 7 – Valores e influência e dependência líquida de cada variável

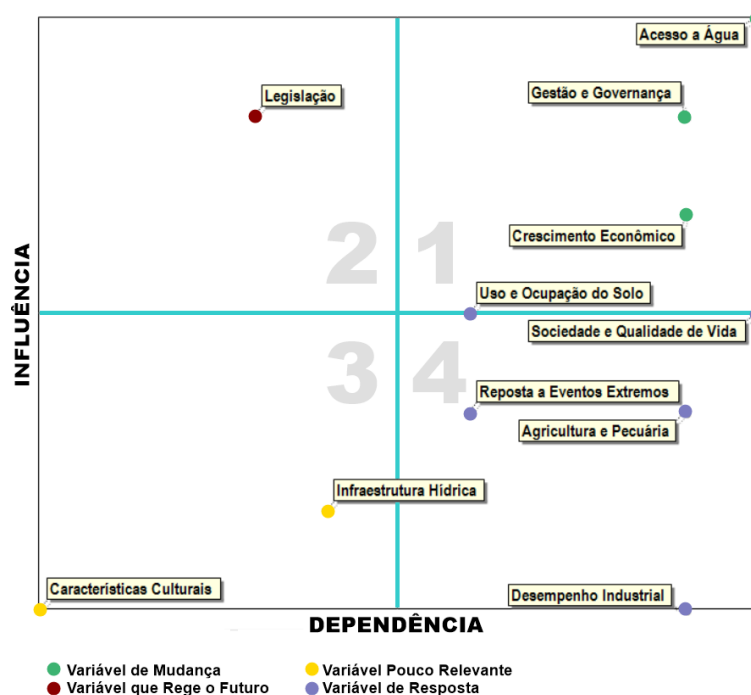
Nº	Variável	Influência	Dependência
1	Acesso à Água	29	29
2	Uso e Ocupação do Solo	26	25
3	Sociedade e Qualidade de Vida	26	29
4	Características Culturais	23	19
5	Crescimento Econômico	27	28
6	Desempenho Industrial	23	28
7	Agricultura e Pecuária	25	28
8	Legislação	28	22
9	Gestão e Governança	28	28
10	Reposta a Eventos Extremos	25	25
11	Infraestrutura Hídrica	24	23
	Total	284	284

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico de influência e dependência das variáveis (Figura 5) as classificam conforme os quadrantes do gráfico, dessa forma, para a análise em questão, percebe-se que a infraestrutura hídrica e, as características culturais da população, podem ser minoradas nesta análise. Vale salientar que a variável infraestrutura hídrica foi elaborada para retratar obras hidráulicas de grande porte (açudes, barragens, transposições), nesse caso obras de distribuição difusa (como

cisternas) não foram consideradas. Por outro lado, a legislação é classificada como a variável que rege o futuro, sendo altamente influente e pouco dependente das demais, conforme previsto por Tundisi (2006) e Vieira (2003).

Figura 5 – Diagrama de influência e dependência entre as variáveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro quadrante indica que o acesso à água, as medidas de gestão e governança e o crescimento econômico acarretam mudanças significativas no sistema a partir da influência das demais variáveis sobre elas, uma vez que essas possuem grande influência e dependência. Em contrapartida, as variáveis do quarto quadrante (uso e ocupação do solo, sociedade e qualidade de vida, resposta a eventos extremos, agricultura e pecuária) são classificadas como variáveis de resposta, refletindo fortemente as mudanças ocorridas nas variáveis de maior influência contidas no primeiro e segundo quadrante (CAMPOS, 2015).

A comparação entre os resultados dos atores permite observar a deformação das alianças e conflitos potenciais, tendo em vista as hierarquias de objetivos e de relações de força entre os atores. A Tabela 8 lista os atores escolhidos e os objetivos de cada um, conforme previstos na Lei 9.433/97, nos portais dos órgãos envolvidos e na bibliografia consultada.

Tabela 8 – Atores envolvidos e seus respectivos objetivos no sistema

Ator	Objetivo
População	Possuir acesso à água potável
Pequenos Agricultores	Expandir suas áreas agrícolas e ter acesso ilimitado à água (para atividades agrícolas e pecuárias)
Latifundiários	Expandir suas áreas agrícolas e ter acesso ilimitado à água (para atividades agrícolas e pecuárias)
Companhias de Água	Possuir acesso ininterrupto à água e lucrar com a venda de serviços
Agência Nacional de Águas	Regular, monitorar e planejar ações sobre recursos hídricos no país
Ministério do Desenvolvimento Regional e Secretarias de Estado	Planejar e coordenar obras contra as secas e de infraestrutura hídrica
Conselhos Nacionais e Estaduais de RH	Desenvolver regras de mediação entre os diversos usuários da água
Comitês de Bacia	Avaliar os reais e diferentes interesses sobre os usos das águas nas bacias hidrográficas
Órgãos Gestores Estaduais	Gerir águas de domínio dos estados e planejar e promover ações direcionadas à preservação da quantidade e da qualidade das águas
Grandes Empresários	Possuir acesso à água de forma ininterrupta para o funcionamento do comércio e indústria

Fonte: Elaborado pelo autor.

As relações de poder entre os atores envolvidos está numericamente expressa como uma escala líquida de influência (Tabela 9), onde o sinal positivo de influência indica que o ator exerce mais influência do que recebe, enquanto o sinal negativo indica que o ator recebe mais influência do que exerce. Dessa forma, podemos destacar a fragilidade dos pequenos agricultores, uma vez que o agronegócio provoca a territorialização do capital, subordinando os camponeses à sua lógica (SANTOS, 2016). Por outro lado, o Ministério do Desenvolvimento Regional e as Secretarias de Estado são elencadas como altamente influentes sobre os atores do sistema.

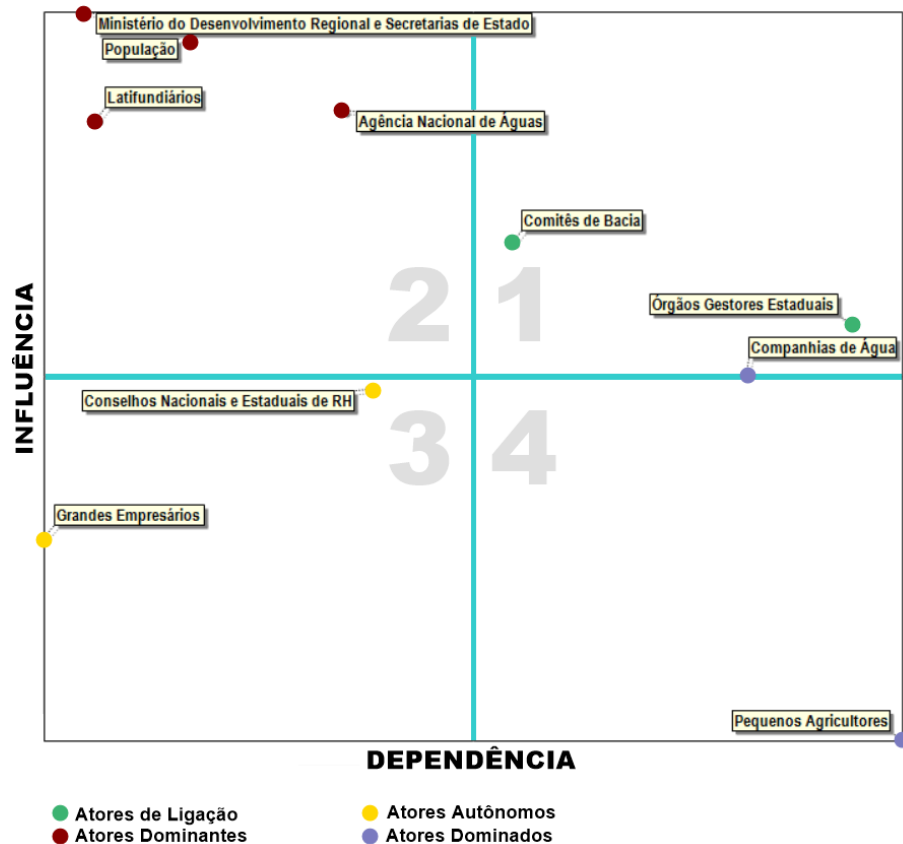
Tabela 9 – Escala líquida de influência entre os atores

Ator	POP	PAGRI	LATF	COMP A	ANA	MDRS	CERH	COMB	OGE	GEMP	INF
População (POP)	-	14	-1	10	3	-1	6	6	10	2	49
Pequenos Agricultores (PAGRI)	-14	-	-13	-7	-13	-15	-8	-10	-7	-6	-93
Latifundiários (LATF)	1	13	-	8	3	-1	4	3	10	4	45
Companhias de Água (COMPA)	-10	7	-8	-	-8	-9	-2	-4	-1	-1	-36
Agência Nacional de Águas	-3	13	-3	8	-	-4	4	2	9	1	27
Ministério do Desenvolvimento Regional e Secretarias de Estado (MDRS)	1	15	1	9	4	-	7	7	11	4	59
Conselhos Nacionais e Estaduais de RH (CNERH)	-6	8	-4	2	-4	-7	-	0	2	0	-9
Comitês de Bacia (COMB)	-6	10	-3	4	-2	-7	0	-	3	-1	-2
Órgãos Gestores Estaduais (OGE)	-10	7	-10	1	-9	-11	-2	-3	-	-1	-38
Grandes Empresários (GEMP)	-2	6	-4	1	-1	-4	0	1	1	-	-2
Influência (INF)	49	-93	45	-36	27	59	-9	-2	-38	-2	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama de influência e dependência entre os atores (Figura 6) enquadra os atores de acordo com suas funções no sistema, sendo os Pequenos Agricultores e as Companhias de Água atores dominados pelo sistema, ou seja, eles são altamente afetados e consequentemente influenciados pelas ações dos demais componentes, por outro lado, os Grandes Empresários e os Conselhos Nacionais e Estaduais de Recursos Hídricos aparecem como atores autônomos, ou seja, influenciam o sistema de forma mais indireta e não dependem diretamente das ações dos demais atores.

Figura 6 – Diagrama de influência e dependência entre os atores

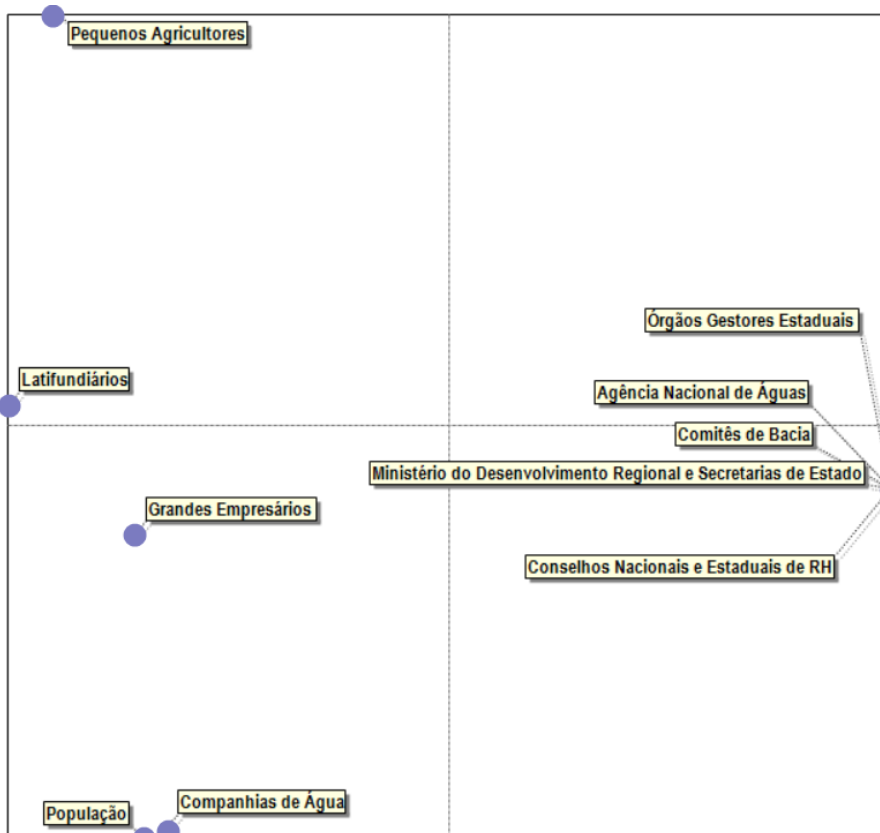


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse mesmo diagrama, em contrapartida, tem-se os atores enquadrados no primeiro quadrante (Comitês de Bacia e Órgão Gestores Estaduais), que representam um elo entre as ações tomadas pelos atores dominantes (Ministério do Desenvolvimento Regional e Secretarias de Estado, População, Latifundiários e Agência Nacional de Águas) e os atores dominados (Companhias de Água e Pequenos Agricultores), tendo grande influência e dependência no sistema. Nesse sistema, a população enquadra-se como ator dominante por sua influência dentro de um regime democrático, onde os órgãos governamentais devem, em tese, priorizar medidas que beneficiem a maior parcela possível de habitantes.

A partir do preenchimento da matriz de posição valorizada, é possível identificar os objetivos que convergem dentro do sistema, a Figura 7 ilustra essas relações e demonstra a convergência entre os objetivos dos Órgãos Gestores Estaduais, da Agência Nacional de Águas, Comitês de Bacia, Ministério do Desenvolvimento Regional e Secretarias de Estado e Conselhos Nacionais e Estaduais e Recursos Hídricos, por outro lado a População e as Companhias de Água também convergem seus objetivos entre si, diferentemente dos demais atores, que possuem objetivos particulares.

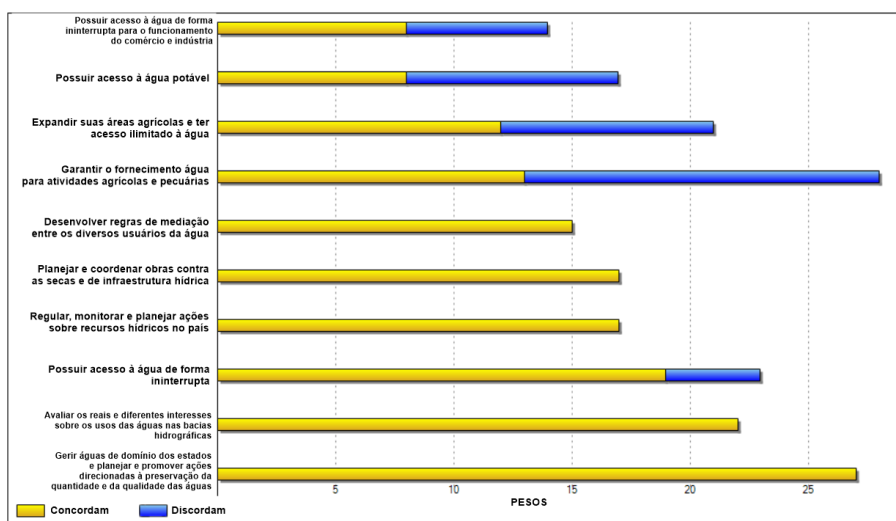
Figura 7 – Diagrama de convergência entre os objetivos dos atores



Fonte: Elaborado pelo autor.

O histograma de implicações dos atores em relação aos seus objetivos (Figura 8) mostra o posicionamento dos atores em relação aos objetivos de cada um. Essa análise é elaborada a partir de pesos relativos à concordância e discordância dos objetivos.

Figura 8 – Histograma de implicações dos atores em relação aos seus objetivos

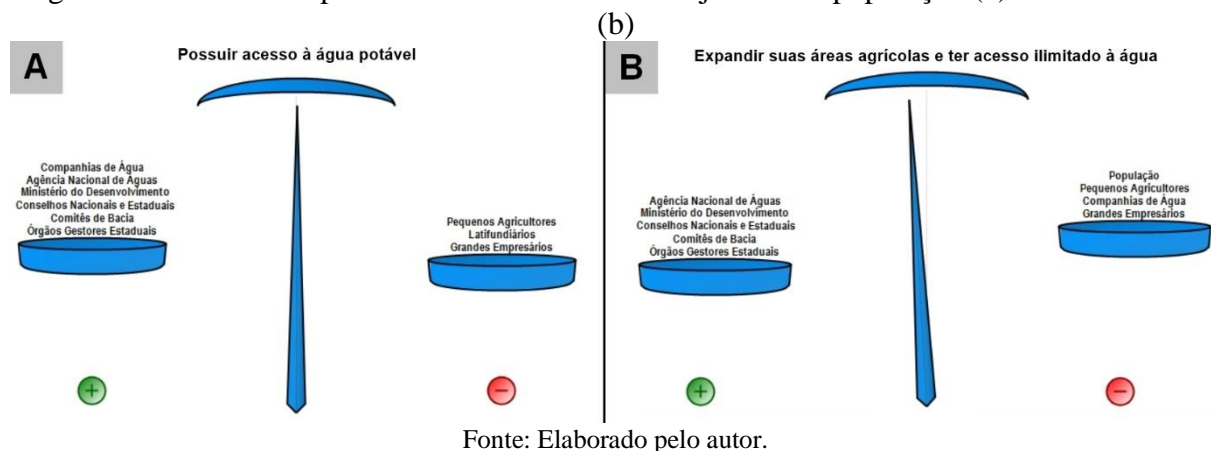


Fonte: Elaborado pelo autor.

O histograma revela que os objetivos de caráter regulador propostos pelo CNERH, MDRS, ANA, COMB e OGE não são contestados pelos demais atores, entretanto, o objetivo dos Pequenos Agricultores, Latifundiários, Grandes Empresários e População geram potenciais conflitos no sistema, uma vez que nem todos os atores concordam com os objetivos propostos.

Por fim, são listadas duas escalas competitivas por objetivo, que analisam o propósito de possuir acesso à água potável por parte da população e a expansão das áreas agrícolas e acesso ilimitado à água por parte dos latifundiários, conforme ilustrado na Figura 9. Com relação ao objetivo da população (Figura 9a), é possível visualizar os atores que contribuem para a realização do objetivo são as COMP, ANA, MDRS, CNERH, COMB e OGE, enquanto os PAGRI, LATF e GEMP competem pelo objetivo e podem se tornar obstáculos para o seu cumprimento, deixando o sistema equilibrado. Por outro lado, os objetivos dos latifundiários (Figura 9b) encontram-se favoráveis dentro do sistema, uma vez que os atores contrários ao objetivo (POP, PAGRI, COMPA e GEMP) exercem uma menor influência se comparados aos atores favoráveis a esse propósito.

Figura 9 – Escalas competitivas de acordo com os objetivos da população (a) e latifundiários



4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas neste estudo através dos métodos MICMAC e MACTOR demonstram uma forma de refletir sobre o comportamento dos atores envolvidos no sistema de recursos hídricos do semiárido e contribuir para a formulação de análises prospectivas para recomendações estratégicas.

Com relação a análise das variáveis estudadas, é possível notar o papel crucial do cumprimento das legislações do país, uma vez que essa foi a única variável categorizada com capacidade de reger o futuro do sistema de acordo com os modelos aplicados. Em contrapartida,

para análises e construções de modelos mais simplificados, o método demonstra que as características culturais e infraestrutura hídrica podem ser minimizadas. A inserção prescindível da infraestrutura hídrica em determinadas modelagens contrapõe ideias historicamente enraizadas nos gestores da região, onde grandes obras hídricas sempre foram vistas como a única solução para garantir a segurança hídrica dos centros urbanos a longo prazo. Ressalta-se que a análise das características culturais da região é de suma importância em diversas esferas de análise dos recursos hídricos, entretanto, devido à dificuldade em quantificar esses aspectos, a variável pode ser minorada para a construção de cenários futuros.

A relação entre os atores estudados demonstra a fragilidade dos pequenos agricultores, figuras presentes no Semiárido Brasileiro que nas últimas décadas têm sua existência ameaçada pela grande expansão latifundiária na região. Os resultados mostram a grande dependência que esses atores possuem dos órgãos governamentais e suas dificuldades em exercer alguma influência dentro do sistema, visto que muitas vezes os próprios órgãos acabam priorizando interesses políticos.

Com relação aos objetivos dos atores, é notória a necessidade de convergência entre as ações dos órgãos públicos com os comitês de bacia, além dos interesses das companhias de água em garantir o acesso à água para a população, uma vez que seus recursos econômicos dependem desse fornecimento. Por outro lado, é possível notar que nem todos os atores concordam com a prioridade da água para a população, uma vez que o histograma de implicações detectou que alguns dos atores discordam, de forma direta ou indireta, a esse acesso.

Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de uma abordagem holística para a gestão da água e da terra no Semiárido Brasileiro. Este capítulo emprega ideias para o desenvolvimento de cenarizações mais fidedignas da disponibilidade hídrica nessa região. Nessa perspectiva, o impacto ocasionado pelas mudanças generalizadas no uso e ocupação do solo, um dos grandes catalisadores que contribui para o comprometimento da disponibilidade hídrica da região, é um fator indissociável para a realização de análises nessa categoria. Dessa forma, a modelagem de cenários preditivos de uso da terra para essa região torna-se uma ferramenta útil para os gestores de recursos hídricos em suas tomadas de decisão.

CAPÍTULO V

5 MODELO DE AUTÔMATO CELULAR INTEGRADO A PRODUTOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: ANÁLISE PROSPECTIVA DO AVANÇO ANTRÓPICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Explorar padrões de LULC futuros é um experimento imprescindível para avaliar as causas e identificar o impacto das mudanças de LULC (GOUNARIDIS et al., 2019). As simulações baseadas em cenários provaram ser uma maneira útil de esboçar como os padrões LULC podem evoluir sob diferentes caminhos com um nível de plausibilidade (ROUNSEVELL; METZGER, 2010). As suposições são inevitáveis e o nível de incerteza pode ser minimizado ao combinar uma análise de tendência empírica a um esboço de diferentes cenários, atributos e condições, por meio de séries e conjuntos de dados LULC históricos.

Os modelos preditivos espaciais simulam a alteração de atributos ambientais, ajudando assim a compreender os mecanismos causais e a dinâmica dos sistemas ecológicos (SOARES-FILHO et al., 2006). Esses modelos e métodos são capazes de diagnosticar e antecipar o desenvolvimento de ambientes humanos, ao apoiar tomadores de decisão, pesquisadores e planejadores na proteção de ecossistemas naturais (ALNSOUR, 2016; MELLO-THERY; LANDY; ZÉRAH, 2010; GANT; ROBINSON; FAZAL, 2011).

Um dos métodos utilizados para realizar previsões sobre as mudanças ambientais é a modelagem dinâmica baseada em CA (SOARES; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002; VAN VLIET et al., 2012; VERBURG; OVERMARS, 2007). CA são sistemas dinâmicos discretos, no qual o espaço é dividido em células espaciais regulares onde o tempo progride em etapas (SANCHEZ et al., 2014).

As mudanças ambientais naturais e variabilidade estão intimamente relacionadas às mudanças no uso do solo impulsionadas por ações humanas. Os padrões e variações da paisagem são causados por processos que ocorrem em múltiplas escalas espaciais e temporais (RUFINO; GALVÃO; CUNHA, 2019). Em um cenário previsto de LULC, a adequação da terra desempenha um papel importante. Em uma matriz de células que representam classes LULC, uma célula pode assumir mais de uma pontuação de adequação para diferentes tipos

propostos (ou idealizados) de LULC. A adequação da terra também está sujeita à mudança do uso da terra em uma função de vizinhança, e as pontuações de adequação devem ser recalculadas em cada interação para atingir LULC compatível (LI; YEH, 2000).

Visando contribuir na produção de mapas anuais de cobertura e uso do solo para todo o território brasileiro, foi criado o Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias). Uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa de especialistas em biomas, uso da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação. Este projeto conta com a plataforma GEE (desenvolvida pelo Google) e seus recursos de processamento em nuvem e classificadores automatizados para gerar as séries temporais anuais de LULC no Brasil de 1985 a 2019 (última coleção disponível). Os dados do MapBiomias utilizam as séries temporais dos satélites Landsat, e todo o processo é baseado em algoritmos de aprendizado de máquina fornecendo produtos altamente confiáveis para toda a extensão territorial do país de forma gratuita e acessível (SOUZA et al., 2020; SOUZA JUNIOR; AZEVEDO, 2017). A resolução espacial dos mosaicos² de imagens de satélite disponíveis para cada bioma brasileiro é de 30m. Ainda, segundo o Projeto MapBiomias (2020), os períodos do ano em que as imagens são selecionadas variam por região (por exemplo, estação chuvosa no Bioma Caatinga).

Como o território brasileiro é vasto, a disponibilidade de bancos de dados espaciais de LULC em uma base anual torna-se uma oportunidade valiosa para gerar cenários futuros para planos de bacias hidrográficas, monitoramento de unidades de conservação ou qualquer outro plano ambiental. Cenários futuros são amplamente usados para o planejamento em escalas urbanas e regionais (KHAN et al., 2018; SANCHEZ et al., 2014; SWEETAPPLE et al., 2019; VANNIER et al., 2019) com base em diferentes métodos e técnicas. O presente capítulo tem como objetivo implementar um modelo baseado em CA usando séries de dados MapBiomias como entrada para o desenvolvimento de cenários futuros de LULC com foco em atividades antrópicas na bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba, vital para a segurança hídrica do estado da Paraíba.

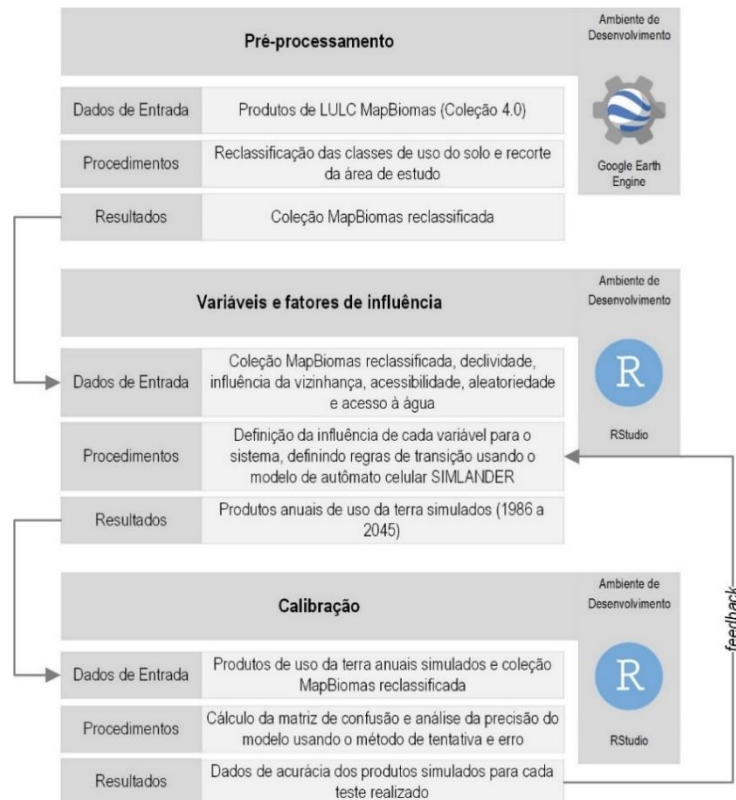
² Mosaicos de imagens de satélite são representações sinóticas e atualizadas de grandes extensões territoriais. No caso do MapBiomias, os parâmetros de classificação das imagens, pré-processamento e avaliação dos resultados ocorrem em grande escala para a geração dos produtos finais, que são os mosaicos de imagens Landsat

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Visão geral do modelo

Os procedimentos de modelagem incluem três etapas (Figura 10). A primeira etapa (pré-processamento) prepara os dados brutos da coleção MapBiomias para serem usados como entrada no modelo. A segunda etapa estabelece as variáveis e gera os fatores de influência com base nas suposições anteriores e na análise espacial. Nesta etapa, as regras de transição são definidas e testadas. Depois que todas as variáveis (fatores de influência) são processadas, a terceira etapa é iniciada, e corresponde aos procedimentos de calibração que iniciam usando duas imagens (uma inicial e uma final) para fazer o modelo alcançar uma melhor precisão (usando uma comparação entre dados simulados e dados brutos). Finalmente, após várias execuções, a melhor acurácia define a regra geral de transição para todo o modelo (em uma equação), possibilitando simulações futuras.

Figura 10 – Fluxo de trabalho dos procedimentos de modelagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Modelo de autômato celular SIMLANDER

O termo SIMLANDER, derivado do inglês *SIMulation of LAND use changE using R*, é um protótipo de modelo de uso do solo de autômato celular construído para o ambiente de software R, sendo um script de código aberto disponível para personalizações e uso geral (HEWITT; DÍAZ PACHECO; MOYA GÓMEZ, 2013). Este protótipo requer dados facilmente obtidos para regiões que carecem de monitoramento. A área de estudo possui dimensões relativamente grandes (aproximadamente 6.700 km²), e a obtenção de dados de campo torna-se um obstáculo para as simulações na região. Nesse contexto, o SIMLANDER apresenta alternativas viáveis baseadas em simulação com dados obtidos por sensoriamento remoto (como declividade) e distâncias euclidianas que podem ser calculadas a partir de vetores fornecidos por órgãos governamentais locais. Este estudo utiliza a versão 1.0.6 do SIMLANDER (a mais recente disponível no momento do processamento dos dados).

O modelo foi criado a partir de uma coleção de rotinas R simples, com base em estudos anteriores sobre CA (BATTY; XIE, 1994; GALE; OLSSON; TOBLER, 1979; WHITE; ENGELEN, 1993). Existem vários aplicativos gratuitos e de código aberto disponíveis para modelos dinâmicos de LULC; entretanto, poucos oferecem possibilidades de alterar o código-fonte para adaptar o modelo de acordo com a região de estudo. Outro ponto forte do protótipo é a fácil incorporação de técnicas estatísticas apropriadas para a avaliação e ajuste do modelo no ambiente R.

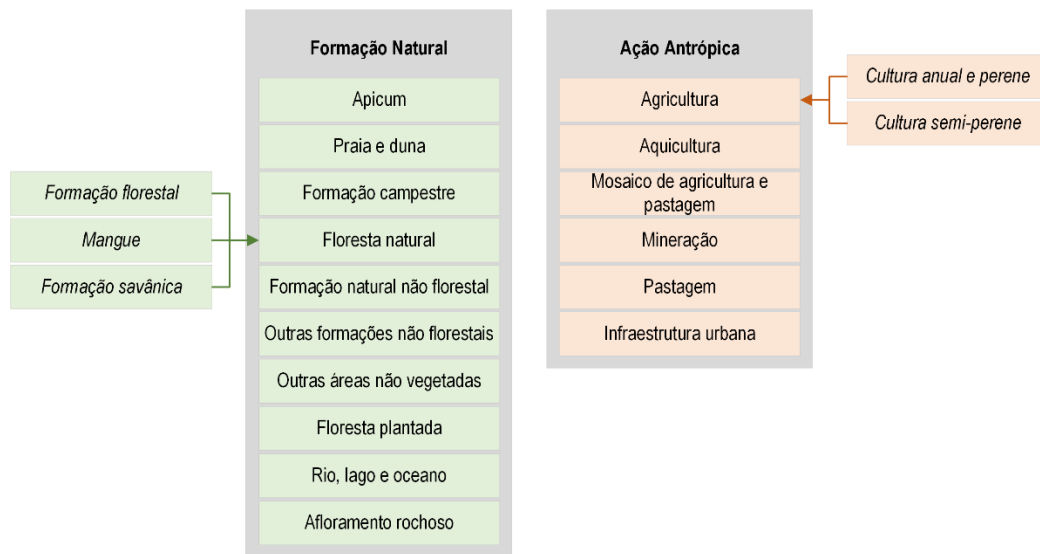
A base do modelo é a demanda pelo uso da terra, também chamada de “reivindicação de terra” (HERMANNNS et al., 2017). Para o desenvolvimento do cenário, o modelo analisa dois mapas de uso do solo em datas diferentes, que posteriormente são subtraídos e divididos pelo intervalo de tempo, onde é feita uma interpolação linear simples entre as duas datas históricas para alocar os pixels que sofreram mudanças. Para a calibração do modelo, são considerados os mapas simulados e observados para a mesma data. Caso os resultados não apresentem a similaridade desejada, as funções e variáveis podem ser ajustadas.

5.2.3 Conjuntos de dados e fatores de influência

Os dados do MapBiomas são um banco de dados altamente confiável e “pronto para uso”. Para a modelagem proposta, a primeira etapa é uma reclassificação usando o ambiente e

scripts do GEE (GORELICK et al., 2017). As classes de MapBiomas (Coleção 4, a última disponível até o momento do estudo) são agrupadas em dois grupos: (i) Ação Antrópica e (ii) Paisagem Natural. A Ação Antrópica inclui seis classes de uso da terra diretamente afetadas pela interferência humana e, também, duas subclasses que compõem a classe agrícola (culturas anuais e perenes e semiperenes). Para esta análise, o grupo Paisagens Naturais inclui áreas com vegetação e todos os corpos hídricos (incluindo lagos e canais feitos pelo homem), uma vez que os pixels da superfície da água em MapBiomas incluem essas intervenções. Nesta bacia, assim como em todo o Semiárido Brasileiro, existe uma forte relação entre as mudanças na superfície da água e índices pluviométricos, além da influência de pressões agrícolas e sociais (KROL et al., 2001; MULTSCH et al., 2020). A Figura 11 mostra as classes selecionadas e agrupadas em duas novas classes, após a operação de reclassificação usando GEE para toda a série temporal.

Figura 11 – Classes de MapBiomas reduzidas (reclassificadas) em dois grupos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Toda a série temporal (de 1985 a 2018) foi reclassificada e recortada no GEE, com base no limite da bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba. Posteriormente os produtos recortados foram inseridos como dados de entradas no modelo de CA desenvolvido no pacote R (TEAM, 2013). O principal desafio do modelo é relacionar as regras de transição com base na influência da vizinhança. Neste estudo, as variáveis explicativas escolhidas podem ser utilizadas em outras regiões, uma vez que os motivos que acarretam no avanço antrópico sob

áreas naturais são influenciados por fatores globais. A Tabela 10 descreve as cinco variáveis e as premissas da modelagem para cada uma delas.

Tabela 10 – Variáveis explicativas e suas premissas

Variável	Hipótese	Referências	Fonte de dados
Declividade	Superfícies de baixa declividade são mais atraentes para atividades humanas (plantações, agropecuária ou assentamentos). Normalmente, as superfícies planas permitem a maior parte das atividades sem alterações topográficas (cortes e aterros) o que torna mais acessível a permanência de assentamentos ou atividades agrícolas e pecuárias.	(GOUNARIDIS et al., 2019; LI et al., 2018; SHU et al., 2020).	Derivado do produto SRTM - <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (FARR et al., 2007)
Influência da vizinhança	Os fatores da atividade humana que causam a fragmentação e degradação do habitat são considerados ameaças. Mudanças no uso do solo tendem a atrair mais mudanças no uso do solo.	(BARREIRA-GONZÁLEZ; BARROS, 2017; LI; YEH, 2020; NEWLAND et al., 2018).	Baseado em (ROODPOSHTI; HEWITT; BRYAN, 2020), através da classificação de uso e ocupação do MapBiomas para o ano de 1985.
Aleatoriedade	Terras não ocupadas podem sofrer alterações por fatores aleatórios. Esta variável inclui esta probabilidade no modelo.	(BATTY, 1997; LOUIS; NARDI, 2018; MUSTAFA et al., 2018).	Coleção de rotinas em R.
Acessibilidade	Quanto mais acessível é uma área (por exemplo, próxima a estradas e rodovias), maior é a chance de que determinados locais passem a ser ocupados.	(FALAH; KARIMI; HARANDI, 2020; GHARBIA et al., 2016; OSIS; LAURENT; POCCARD-CHAPUIS, 2019).	(DNIT, 2013)
Proximidade a corpos hídricos	Historicamente, os assentamentos começam ou se espalham próximos a corpos hídricos, através da disponibilidade de água. A facilidade de acesso ao recurso também viabiliza práticas agrícolas e pecuárias nas regiões próximas.	(FITAWOK et al., 2020; GOUNARIDIS et al., 2019; KESHTKAR; VOIGT, 2016; OSIS; LAURENT; POCCARD-CHAPUIS, 2019).	(AESAs, 2018)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A variável proximidade a corpos hídricos não está inicialmente presente no SIMLANDER; no entanto, acredita-se que no contexto da área, a disponibilidade de água é um fator intrinsecamente ligado à presença humana, impulsionando as práticas agrícolas e

pecuárias na região. Os dados de declividade foram derivados dos dados SRTM e classificados de acordo a porcentagem de declividade. A Tabela 11 mostra a normalização da declividade em um intervalo de 0 a 1. O valor 0,4 significa a probabilidade mais difícil de ocupação (ou mudanças) e o valor 1 significa a probabilidade mais direta de ocupação ou mudança por alguma atividade humana.

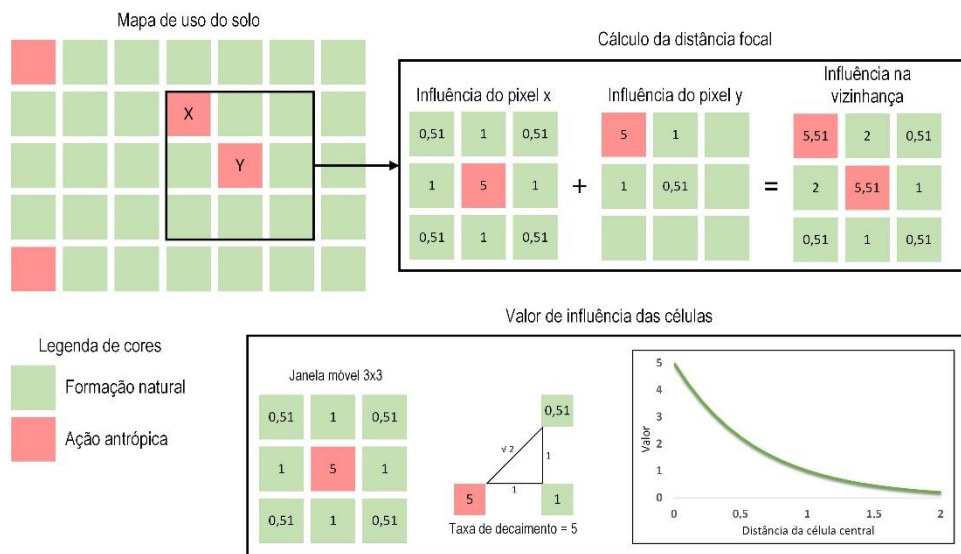
Tabela 11 – Classes de terreno de relevo reclassificadas em um intervalo (de 0 a 1)

Variável	Valores atribuídos		
	0,4	0,6	1,0
Declividade (%)	Superior a 45,01%	Entre 8,01 e 45%	Entre 0 e 8%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a variável Influência de Vizinhança, foi criada uma janela móvel ponderada com base na calibração automática proposta por Roodposhti, Hewitt e Bryan (2020), a calibração é usada para detectar o tamanho e os pesos da janela móvel. Assim, a influência das células é função da distância da célula central, onde a distância das células nas posições dos cantos é calculada usando o Teorema de Pitágoras a partir de uma taxa de decaimento usando interpolações suaves e lineares. A Figura 12 usa uma janela móvel 3x3 arbitrária como exemplo para explicar como a distância focal (influência das células antropogênicas na vizinhança) é calculada pixel a pixel (célula por célula), com interpolação suave para toda a área, usando a soma de todos os pesos na janela em movimento.

Figura 12 – Influência das células vizinhas e função de redução da distância da célula para uma janela móvel 3x3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pesos são aplicados no modelo para produzir mapas de probabilidade para transições de cobertura da terra que representam as áreas mais suscetíveis a mudança (FOLLADOR et al., 2019; SOARES-FILHO et al., 2006). Este método calcula a probabilidade de um evento ocorrer (neste caso, antropização) dada uma condição a priori favorável ao evento (BONHAM-CARTER, 2014). Os coeficientes dos pesos representam a influência de cada categoria (faixa de valores) de uma determinada variável na mudança da cobertura do solo, neste caso, a transição da paisagem natural para área antropizada. O primeiro passo é sempre mapear essa mudança na cobertura do solo (RAMOS; GRAÇA; FEARNSSIDE, 2018).

A modelagem também considera a aleatoriedade (estocasticidade) das mudanças no uso da terra como um avanço antropogênico imprevisível. Essa variável criou um mapa de valores aleatórios para a região de estudo, atribuindo valores arbitrários aos pixels, a faixa de valores pode ser facilmente alterada pelo usuário, para este estudo utilizou-se a faixa pré-estabelecida pelo SIMLANDER (0 a 30).

Mapas de distâncias euclidianas (DANIELSSON, 1980) são gerados para as variáveis de acessibilidade e água a água através do software ArcMap (versão 10.5). A distância às principais estradas e corpos d'água como lagos e rios permite atribuir a cada pixel valores de distância em metros, distâncias de 0 a 5000 metros foram utilizadas para compor os mapas de distâncias euclidianas. Ambas as variáveis são, então, ajustadas para uma faixa de valores de 0

a 1, usando a equação de acessibilidade (Equação 2) proposta por White, Engelen, & Uljee (1997).

$$access = a_j \left(1 + \frac{D}{\partial_j} \right)^{-1} \quad (2)$$

Onde: access = acessibilidade ou proximidade a corpos hídricos;

a_j = coeficiente (1 para este estudo);

D = Distância euclidiana;

∂_j = coeficiente que expressa a importância do acesso para a conveniência da célula para a atividade terrestre j (1000 para este estudo);

Todas as variáveis explicativas são geradas usando uma resolução espacial de 30 metros para coincidir com a resolução das classificações MapBiomias (baseadas no Landsat). Seguindo os procedimentos mostrados na Figura 10, a próxima etapa refere-se à calibração do algoritmo para encontrar a melhor regra de transição que represente as mudanças na bacia hidrográfica, ao comparar os dados do MapBiomias aos dados simulados. Os valores de acurácia indicam o sucesso da calibração. Posteriormente, um mapa de uso da terra é simulado para a bacia hidrográfica de 1985 a 2015 em intervalos de um ano.

5.3 REGRAS DE TRANSIÇÃO E CALIBRAÇÃO

As regras de transição descrevem e convertem todos os fatores de influência em um único mapa, gerando um produto dinâmico que usa a última simulação obtida como entrada para gerar o próximo mapa (para a primeira simulação, o mapa base é a classificação de LULC do MapBiomias para o ano de 1985). A Equação 3 normaliza todas as variáveis explicativas, uma vez que todas as variáveis mudam seus valores para uma nova faixa comum (de 0 a 1) e os coeficientes são atribuídos com base nos resultados obtidos no processo de calibração.

modelo de transição

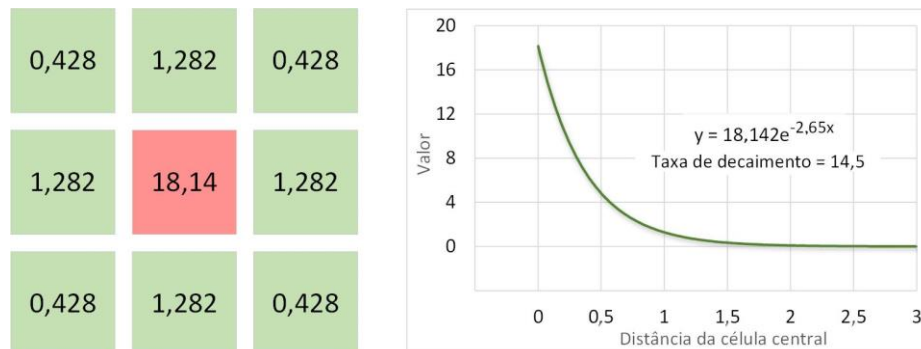
$$= (accessibilidade + \beta) * (declividade + \gamma) * (mviz * \delta) * (aleatoriedade + \varepsilon) * (proagua + \theta) \quad (3)$$

Onde: acessibilidade = variável de acessibilidade;
declividade = variável de declividade;
mviz = variável do modelo de vizinhança;
aleatoriedade = variável de aleatoriedade;
proagua = variável de proximidade a corpos hídricos;
 $\beta, \gamma, \delta, \epsilon$ e θ = coeficientes associados as variáveis.

A calibração do modelo é baseada em toda a série temporal (1985 a 2015). A acurácia da simulação, para o período de treinamento do modelo, foi avaliada comparando cenários simulados e os “cenários reais” do MapBiomias como dados de referência. Ao usar a janela móvel pré-estabelecida e o modelo de transição, os primeiros resultados indicaram a precisão de aproximadamente 56% entre os mapas simulados de 2015 e os mapas de referência MapBiomias. A partir desse resultado, iniciou-se o processo de calibração baseado em três fatores-chave: (i) os valores da matriz de vizinhança, (ii) o tamanho da matriz e (iii) a regra de transição para o modelo.

Roodposhti, Hewitt e Bryan (2020) desenvolveram uma detecção automática da regra de vizinhança que melhora significativamente o processo de calibração. O modelo testa automaticamente diferentes tamanhos e valores para pixels da janela móvel. Ao final das corridas, vários fatores (precisão, área sob a curva, índice de forma, dimensão fractal, aglomeração e índice de densidade de borda) são considerados para eleger uma janela que melhor represente o processo de influência da vizinhança na área de estudo. A Figura 13 ilustra a janela móvel escolhida após o processamento.

Figura 13 – Janela móvel de interpolação suave, determinada automaticamente para a área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez estabelecidos o tamanho e os valores para a janela móvel, a próxima etapa da calibração é determinar os coeficientes do modelo de transição. Os coeficientes presentes no modelo de transição foram testados um a um e tiveram seus valores alterados durante a calibração. O aumento da precisão é o objetivo do método de tentativa e erro aplicado junto com o processamento. A abordagem de tentativa e erro é um método que tem sido usado em outros estudos de mudança de uso da terra, para aumentar a precisão da simulação durante a calibração do modelo (CARLSON, 2004; SUN; FORSYTHE; WATERS, 2007; SUNDE et al., 2014). A Equação 4 apresenta a formulação final que representa a melhor precisão alcançada, atingindo uma precisão de 76,16% para o ano de 2018 após o processo de calibração.

modelo de transição

$$= (\text{acessibilidade} + 1) * (\text{declividade} + 1) * (\text{mviz} * 0,2) \quad (4) \\ * (\text{aleatoriedade} + 1) * (\text{proagua} + 1)$$

A validação ocorreu com base nos dados de precisão, que foram calculados pixel a pixel para todos os produtos anuais. Os anos de 2016, 2017 e 2018 serviram para testar a eficácia do modelo (calculado com base no ano de 1985) de forma que a baixa precisão desses anos indicaria ineficiência do modelo para os anos subsequentes. Após a calibração do modelo com sucesso, a simulação foi executada até o ano de 2045 e os resultados do modelo foram validados para os anos de 1986 a 2018 usando os mapas de referência do MapBiomias. A calibração do modelo foi julgada com base na correspondência de medidas de LULC simulados e mapas de LULC de referência do MapBiomias (a partir do mapa de diferença, obtido pela operação de

álgebra de mapa básica). A Tabela 12 mostra os valores de acurácia para todo o período de treinamento. Para os cenários futuros (após 2018 e sem dados de referência para comparar), a precisão prevista é calculada por meio de regressão linear com base nos valores já registrados.

Tabela 12 – Valores de acurácia obtidos a partir da comparação com produtos MapBiomias

Ano	Acurácia (%)	Ano	Acurácia (%)	Ano	Acurácia (%)
1986	93,24	2006	80,69	2026	74,27
1987	90,57	2007	80,66	2027	73,94
1988	88,13	2008	80,71	2028	73,60
1989	86,88	2009	80,52	2029	73,27
1990	85,81	2010	80,32	2030	72,93
1991	84,83	2011	80,05	2031	72,59
1992	84,18	2012	79,95	2032	72,26
1993	83,69	2013	79,64	2033	71,92
1994	83,15	2014	79,18	2034	71,59
1995	83,05	2015	78,94	2035	71,25
1996	83,00	2016	78,13	2036	70,91
1997	82,82	2017	77,62	2037	70,58
1998	82,90	2018	76,16	2038	70,24
1999	82,67	2019	76,63	2039	69,91
2000	82,35	2020	76,29	2040	69,57
2001	82,03	2021	75,95	2041	69,24
2002	81,80	2022	75,62	2042	68,90
2003	81,45	2023	75,28	2043	68,56
2004	81,18	2024	74,95	2044	68,23
2005	80,78	2025	74,61	2045	67,89

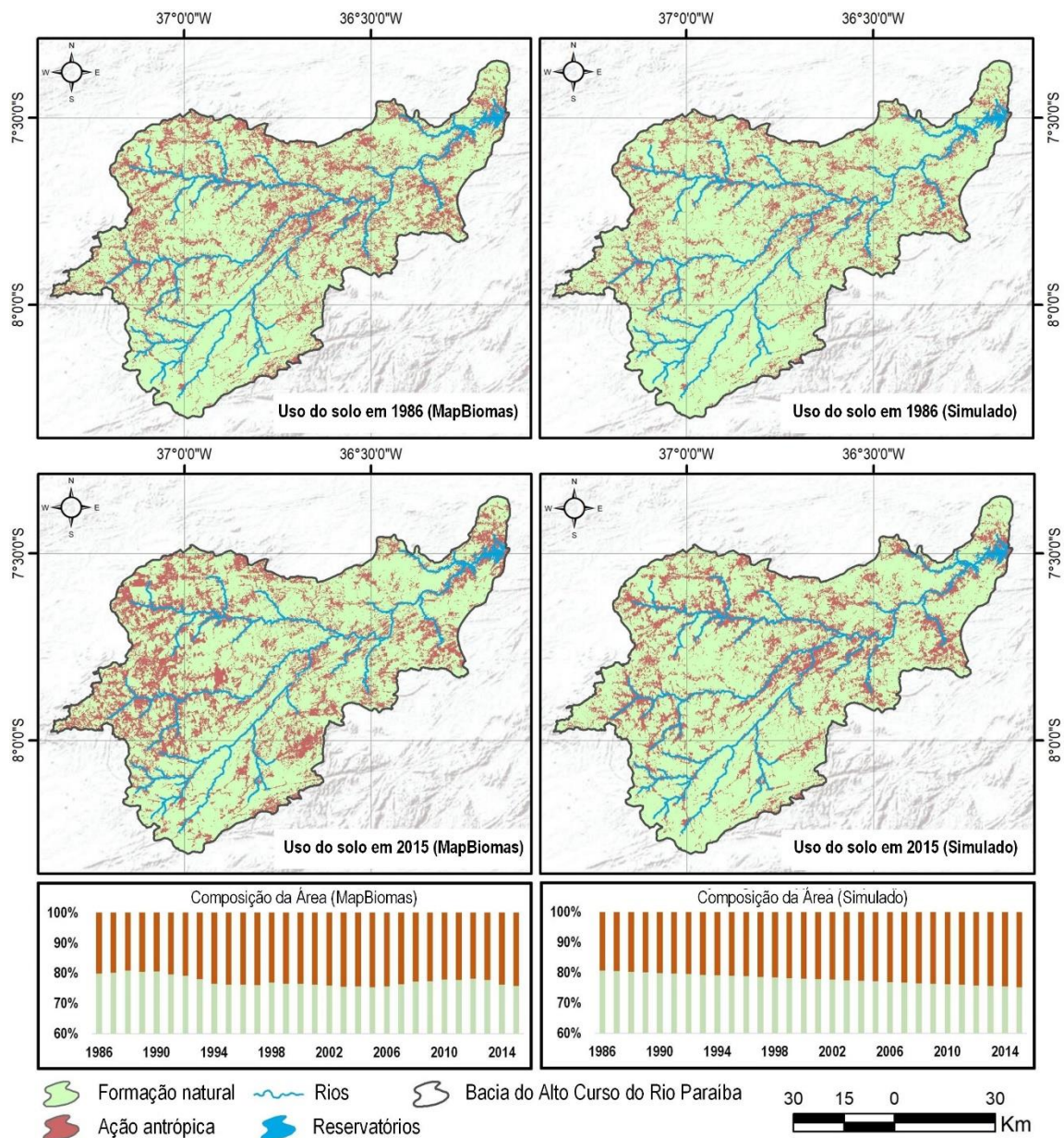
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A ação antrópica na bacia hidrográfica ocorre de forma intensa. O crescimento e o desenvolvimento urbano pressionam os recursos naturais e energéticos na região da Caatinga. A partir dos dados do MapBiomias, é possível perceber uma redução da vegetação nativa ao longo dos anos. A Figura 14 mostra uma comparação entre os mapas anuais de uso da terra do MapBiomias e os mapas simulados. A principal diferença reside no fato do modelo utilizar estimativa de decaimento linear, portanto o modelo sugere uma diminuição linear das áreas de cobertura natural ao longo do tempo, porém, é possível notar que a região apresentou oscilações e uma ligeira recuperação da vegetação no ano de 2010. A dinâmica intra-anual da vegetação

da Caatinga impulsiona esse fato (ANDERSON-TEIXEIRA et al., 2013). O material fotossintético da vegetação, que normalmente é utilizado como indicador de mudanças no LULC, está fortemente relacionado com a estação chuvosa que ocorre no primeiro semestre do ano (HEIN et al., 2011). As mudanças climáticas e a variabilidade natural do clima do semiárido provocam anomalias no período de chuvas, além prolongar períodos de seca.

Figura 14 – Comparações entre os mapas de LULC simulados e mapas do MapBiomas



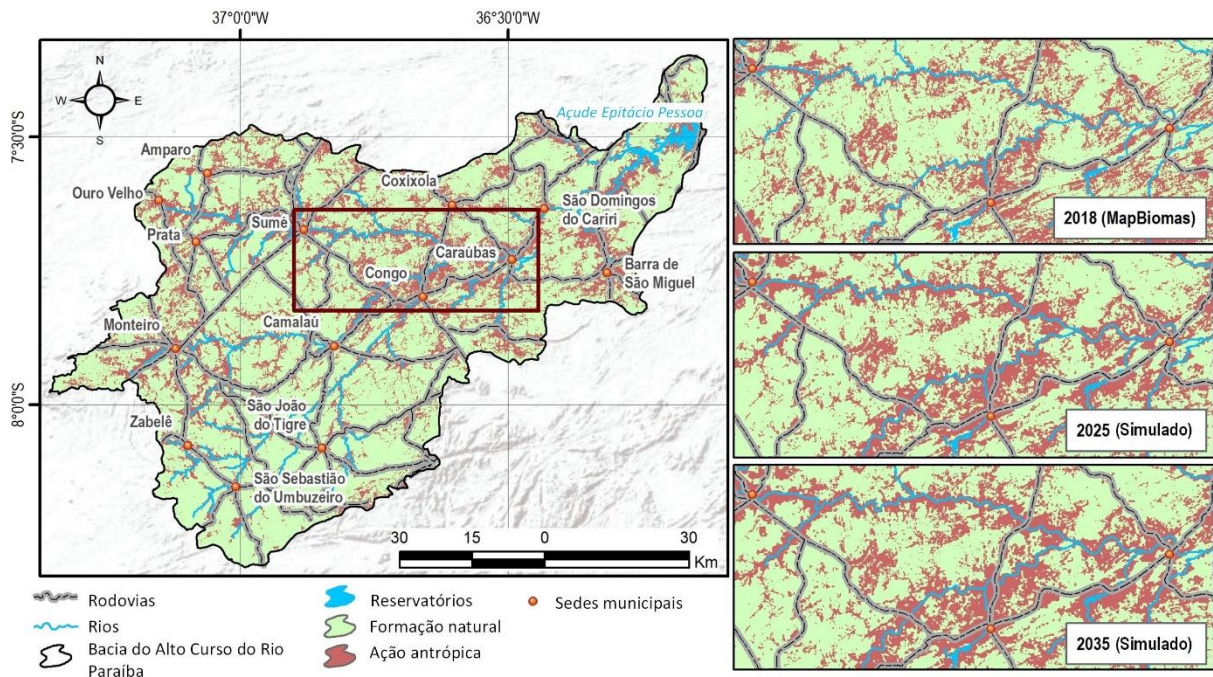
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa variabilidade climática e espacial muitas vezes mascara a influência antrópica no desmatamento e na alteração de uso da terra, especialmente após longos períodos de seca. Tal fato desafia classificações remotas de LULC por sistemas de aprendizagem de máquina, como na metodologia MapBiomas (CUNHA et al., 2019).

A distribuição espacial da interferência antrópica foi satisfatória no modelo ao comparar a diferença entre os mapas. No entanto, a simulação falhou em prever as mudanças LULC no noroeste da bacia hidrográfica. O crescimento de áreas antrópicas nesta região ocorreu principalmente devido à expansão agrícola em fazendas próximas a corpos d'água. Nos testes de calibração, esse crescimento foi acionado pela variável proximidade a corpos hídricos, através do aumento do coeficiente θ . A influência da disponibilidade de água leva a mudanças de LULC em diferentes proporções e, os caminhos sobre a área da bacia hidrográfica e fatores de influência adicionais (contendo informações de escalas maiores, mais local), podem ajudar a refinar a simulação para essas áreas.

Para os cenários futuros, a regressão linear indica uma precisão aproximada de 67,89% para o ano de 2045 (maior horizonte simulado). A simulação para aquele ano (Figura 15) sugere uma ação antrópica acentuada na região central da bacia, fato que pode ser agravado pelo aumento da disponibilidade hídrica oriundo do PISF. Além disso, o desenvolvimento urbano mal planejado na região noroeste da bacia pode comprometer a segurança hídrica urbana, através do lançamento de afluentes no Rio Paraíba, principal responsável pela recarga do Açude Epitácio Pessoa (fonte única de abastecimento de água para mais de 700 mil habitantes em diversos municípios).

Figura 15 – Simulação de LULC para o ano de 2045, com ênfase no perímetro irrigado ao longo do rio Sucuru para 2018, 2025 e 2035



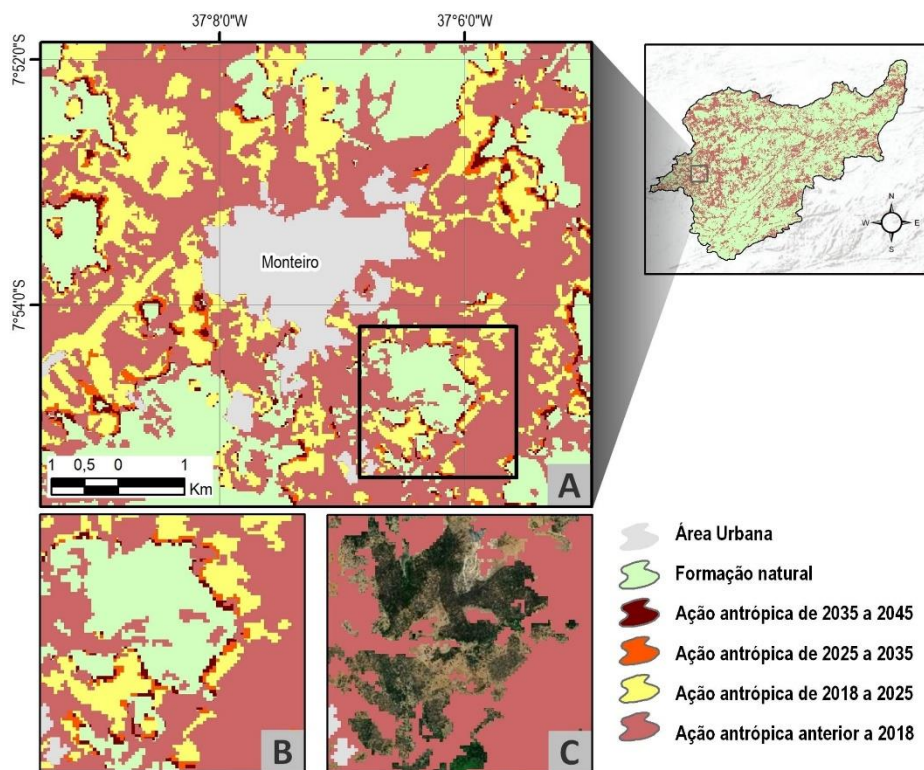
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 15 ilustra o ano de 2045 para toda a bacia hidrográfica e destaca uma área irrigada ao redor do rio Sucuru. Essa área, denominada "perímetro irrigado de Sumé", foi inaugurada em 1976 e reestruturada em 2006; faz parte da estratégia estadual de expansão da atividade agrícola. No início, a construção dos canais de irrigação impulsionou o desenvolvimento socioeconômico da região (PONTES et al., 2013). Mais recentemente, o perímetro concentra atividades relacionadas à pequena pecuária e à horticultura. A expansão da pecuária é uma ameaça visto que o perímetro fica nas margens do rio Sucuru. A pecuária na Caatinga é um dos principais motores da supressão da vegetação e compromete a sustentabilidade de uma área aluvial como o rio Sucuru, aumentando o risco de desertificação (TSUYUGUCHI et al., 2020).

Tendo uma bacia hidrográfica de cerca de 6.700 km², prever cenários nesta escala espacial torna-se um desafio. Ao analisar um bioma altamente dinâmico, como é o caso da Caatinga, existe a dificuldade em modelar cenários futuros que transcendem o entendimento do comportamento humano e leve em consideração as oscilações climáticas e fenológicas ao longo das décadas. Dessa forma, o comportamento imprevisível em diferentes partes da bacia é um desafio para os modelos preditivos.

Em algumas amostras em uma escala maior (por exemplo, sub-bacias, zonas urbanas), algumas questões podem ser melhor esclarecidas e analisadas. A Figura 16a mostra os resultados das simulações em torno de uma sede municipal (zona urbana de Monteiro-PB), o município mais populoso da região. Na parte sudeste desta área urbana é possível identificar o aumento da ação antrópica sobre a cobertura natural do solo (Figura 16b). É possível visualizar uma área de vegetação rala e seca cercada por pequenas lavouras com aproximadamente 80 hectares, que está potencialmente ameaçada pelo progresso antrópico na região (Figura 16c).

Figura 16 – Avanço da ação antrópica no entorno da área urbana de Monteiro-PB

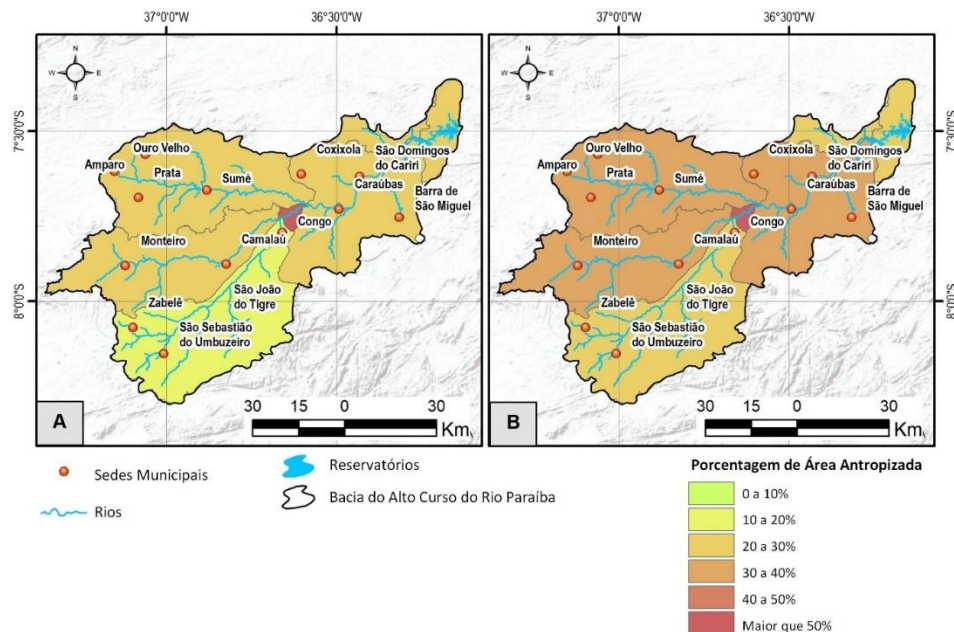


O município de Monteiro está localizado na divisa entre os estados da Paraíba e Pernambuco, sendo o primeiro município a ter acesso à água da transposição do São Francisco no estado da Paraíba. Nesse contexto, essa região é um ponto crucial para o eixo leste da transposição e uma gestão ineficiente dos recursos hídricos a montante, que não priorize a distribuição de água para a população, pode comprometer toda a disponibilidade hídrica dos municípios a jusante.

Vale ressaltar que uma das principais vantagens dos modelos preditivos é a capacidade de preencher eventuais lacunas temporais para gerar mapas (dados perdidos) ao longo da série. Nesse caso, o modelo utilizado pode fornecer mapas de uso da terra para períodos intermediários, sem a necessidade de registros anteriores. Outra contribuição significativa é a possibilidade de utilizar as simulações como dados de entrada (cenários) em modelos hidrológicos (concentrados ou distribuídos), em entradas agregadas (zonais) ou matriciais. Um modelo concentrado de chuva-vazão usa dados agregados (por exemplo, um valor percentual de uso e ocupação da terra por sub-bacia), enquanto os modelos distribuídos usam células para descrever e dividir a bacia hidrográfica e executar o balanço hídrico para cada pixel (ou célula).

Para uma melhor análise de mudança de LULC, os mapas tiveram suas classes extraídas por sub-bacias para os anos 2018 e 2045. A Figura 17 mostra uma comparação do mapa da porcentagem da área por sub-bacia em 2018 (Figura 17a) e 2045 (Figura 17b). Esses limites estão disponíveis através da ANA (2012) e utilizam o método Otto Pfafstetter. Por conseguinte, é possível verificar um aumento das áreas antrópicas em todas as sub-bacias. De acordo com a simulação preditiva, as sub-bacias localizadas na porção noroeste irão sofrer alterações mais acentuadas do que as demais. Essa tendência é facilmente explicada pelo avanço da atividade agrícola na região. Outra aplicação desses resultados, é a utilização dos mapas preditivos no apoio ao planejamento estratégico a longo prazo, que, somados a modelos climáticos e hidrológicos podem contribuir substancialmente os tomadores de decisão.

Figura 17 – Porcentagens de antropização, por sub-bacias, na bacia do Alto Curso do Rio Paraíba em 2018 (segundo o MapBiomass) e 2045 (simulado)



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados nesta etapa, é possível observar uma mudança acelerada nas pressões antrópicas na região semiárida do Brasil, que contempla o bioma exclusivamente brasileiro, a Caatinga, de patrimônio natural da biodiversidade. No caso de não haver controle ou iniciativas de conservação, o modelo mostra que as áreas antrópicas continuarão a se expandir e, conseqüentemente, a degradação ambiental continuará a progredir na região.

Torna-se evidente que a gestão ambiental não deve ser conduzida apenas por ações emergenciais ou reativas. Os modelos preditivos mostram cenários futuros que podem apoiar os sistemas de alerta e criar oportunidades para uma melhor tomada de decisão, oferecendo respostas a várias questões complexas.

A transposição do Rio São Francisco aumenta a disponibilidade hídrica da região e impulsiona as mudanças de LULC, mas afinal, quais são as reais conseqüências da transposição do Rio São Francisco em uma região historicamente mal regulada, onde os latifundiários ainda detêm privilégios relacionados à disponibilidade de água em suas terras (pequenos açudes e barragens particulares)? Além disso, essa disponibilidade hídrica deve criar pressões diferentes,

uma vez que a transposição, em alguns trechos, perpetua rios sazonais (como o Rio Paraíba, por exemplo). Nesse sentido, como planejar iniciativas ambientais para proteger e mitigar os impactos das LULC que parecem inevitáveis nessas áreas e garantir a segurança hídrica para todos os atores envolvidos?

No Semiárido Brasileiro, garantir a segurança hídrica e preservar o habitat natural constitui um desafio duplo, que só pode ser resolvido por meio de uma GIRH, capaz de equilibrar as necessidades dos humanos e da natureza. Essa região carece de uma compreensão entre os riscos decorrentes da expansão humana e fatores climáticos, capazes de comprometer a segurança hídrica. Para isso, alcançar essa segurança é um desafio que deve ser primeiramente reconhecido, para que possa ser vencido.

CAPÍTULO VI

6 SEGURANÇA HÍDRICA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: DESAFIOS E RISCOS FUTUROS

6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os recursos hídricos são diretamente ameaçados pelas atividades humanas, por meio de mudanças generalizadas na cobertura do solo, urbanização, industrialização, obras de engenharia, irrigação e transposição de água entre bacias hidrográficas que maximizam o acesso hídrico. Os benefícios do fornecimento de água aos centros urbanos e à produção agrícola são frequentemente acompanhados por danos aos ecossistemas e à biodiversidade, potencialmente graves, mas dificilmente quantificados (ABELL et al., 2008; VERONES et al., 2017). A elaboração de intervenções, que incluam convenções e avaliações científicas para proteger a biodiversidade aquática e garantir a sustentabilidade dos sistemas de distribuição de água, requer estruturas para diagnosticar as principais ameaças à segurança hídrica em uma variedade de escalas espaciais (VÖRÖSMARTY et al., 2010).

Para desenvolver indicadores nessa perspectiva, Lautze e Manthrihilake (2012) identificaram cinco fatores críticos para a segurança hídrica: (i) necessidades básicas, (ii) produção agrícola, (iii) meio ambiente, (iv) gestão de riscos e (v) independência. Nesse caso, o fator “gestão de risco” está intrinsecamente associado à prevenção de desastres relacionados à água.

Os riscos associados aos recursos hídricos são comumente associados ao excesso de água ou a sua escassez. No Semiárido Brasileiro, a escassez de água é um problema recorrente, constantemente agravado por secas históricas, relatadas desde o século XVI (CAMPOS, 2015; MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016). Segundo Londe et al. (2014), os impactos da seca na região semiárida brasileira tendem a ser subestimados, embora sejam um problema frequente em diversos municípios brasileiros, onde representam, secularmente, um quadro de risco para a população (SILVA et al., 2013). Os períodos de seca podem ser influenciados pelas mudanças climáticas e, embora possuam origem meteorológica, os efeitos são drasticamente ampliados pela degradação e ocupação desordenada da terra, o que aumenta a pressão antrópica sobre os recursos hídricos (FALKENMARK, 2013).

A segurança hídrica também está, portanto, associada às pressões crônicas e eventos extremos. Nesse contexto, o conceito de risco torna-se cada vez mais atraente para enquadrar, medir e informar as respostas aos desafios da segurança hídrica futura. Desse modo, este capítulo objetiva elaborar uma nova dimensão para o ISH, capaz de representar espacialmente o risco associado as interferências antrópicas (representadas pelas mudanças no uso do solo) e ao fenômeno da seca na região semiárida do país.

6.2 O ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA DO BRASIL

O ISH foi elaborado no âmbito do PNSH para retratar as condições atuais e perspectivas futuras da segurança hídrica no território brasileiro, através das diferentes dimensões da segurança hídrica, incorporando o conceito de risco aos usos da água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019).

Os conceitos envolvidos na composição do ISH foram estruturados de acordo com dimensões, indicadores e variáveis. Dessa forma, foram estruturadas quatro dimensões para a elaboração do índice: Humana, Econômica, Ecológica e de Resiliência. Cada dimensão é composta por um ou mais indicadores, formando uma combinação de variáveis ou atributos mensuráveis que, segundo a ANA, são capazes de quantificar aspectos pertinentes à segurança da água.

As dimensões humana e econômica permitem quantificar os déficits de atendimento às demandas efetivas (abastecimento humano e setor produtivo), enquanto as demais dimensões (ecológica e resiliência) possibilitam identificar as áreas as mais críticas e vulneráveis.

Os indicadores possuem valores normalizados, com a atribuição de números naturais entre 1 e 5, em ordem decrescente do nível de segurança hídrica. Com exceção do indicador de segurança das barragens de rejeito de mineração, que varia de 1 a 3. Por fim, o grau de segurança hídrica é resultante de uma média simples ou ponderada dos graus de segurança de cada dimensão. Os cálculos foram realizados na escala de ottobacia³ e os indicadores que apresentam valor nulo não participam da média.

O ISH foi calculado para dois cenários, referente aos anos de 2017 e 2035 (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019a). As mudanças entre o cenário observado e o

³ Ottobacias são subdivisões das bacias hidrográficas em áreas menores, de maior detalhe, realizadas de acordo com metodologia desenvolvida pela ANA, que tem por base teórica o método de codificação de cursos de água desenvolvido por Otto Pfastetter.

previsto ocorrem em duas variáveis: nas estimativas de demanda por água e na estimativa da população urbana, alterando apenas o grau da Dimensão Humana. Dessa forma, os impactos ocasionados pela expansão do agronegócio e demais atividades antrópicas e, o consequente aumento da demanda de água para essas atividades, não são considerados.

No contexto do PNSH, o risco hídrico é tratado com base na demanda e oferta de água, sendo caracterizado em duas grandes tipologias: risco pós-déficit, que corresponde ao valor em risco quando uma parcela da demanda não está sendo suprida, e risco iminente, correspondente ao valor em risco que pode ocorrer no limiar do déficit, porém, ainda antes de sua ocorrência. Esses riscos foram calculados em termos de população exposta a déficits hídricos (dimensão humana do ISH) e de valores monetários de produção econômica perdida devido a demandas não atendidas (dimensão econômica).

6.3 A ANTROPIZAÇÃO E A SECA COMO INDICADORES DE RISCO

O risco é o resultado da interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade. O perigo é caracterizado como um evento perigoso que pode afetar diferentes locais em momentos distintos (com uma certa intensidade e frequência de ocorrência), enquanto a exposição é composta pelos valores humanos presentes no local envolvido. Já a vulnerabilidade abrange as características e circunstâncias de uma comunidade ou sistema, que é suscetível aos efeitos prejudiciais de um perigo (FRIGERIO; DE AMICIS, 2016; KRON, 2002; WISNER et al., 2004).

Considerando as definições expostas, o risco pode ser caracterizado como o potencial de materialização de resultados indesejáveis (HALL; BORGOMEIO, 2013). No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, os riscos associados a segurança hídrica ocorrem em decorrência dos impactos do crescimento populacional, urbanização, degradação ambiental e desenvolvimento econômico, justapondo à demanda acelerada de água urbana e à escassez provocada por períodos de seca (HOPE; ROUSE, 2013).

Entre os desafios para alcançar a segurança hídrica destacam-se o perigo climático, relacionado aos eventos climáticos extremos (chuvas intensas ou escassez), e a exposição, que representa a natureza e o grau em que um receptor é exposto aos riscos climáticos ou meteorológicos (KAŻMIERCZAK; CAVAN, 2011; PARRY et al., 2007).

A preparação para um futuro incerto pode ser abordada através da melhoria da adaptação à variabilidade climática (BURTON, 1997). Nesse sentido, a análise de riscos fornece evidências essenciais para escolhas entre diferentes alternativas de ação e permite uma maior compreensão sobre a materialização dos impactos da seca, através de avaliações que contribuam para o planejamento espacial da redução do risco e opções de adaptação (HAGENLOCHER et al., 2019).

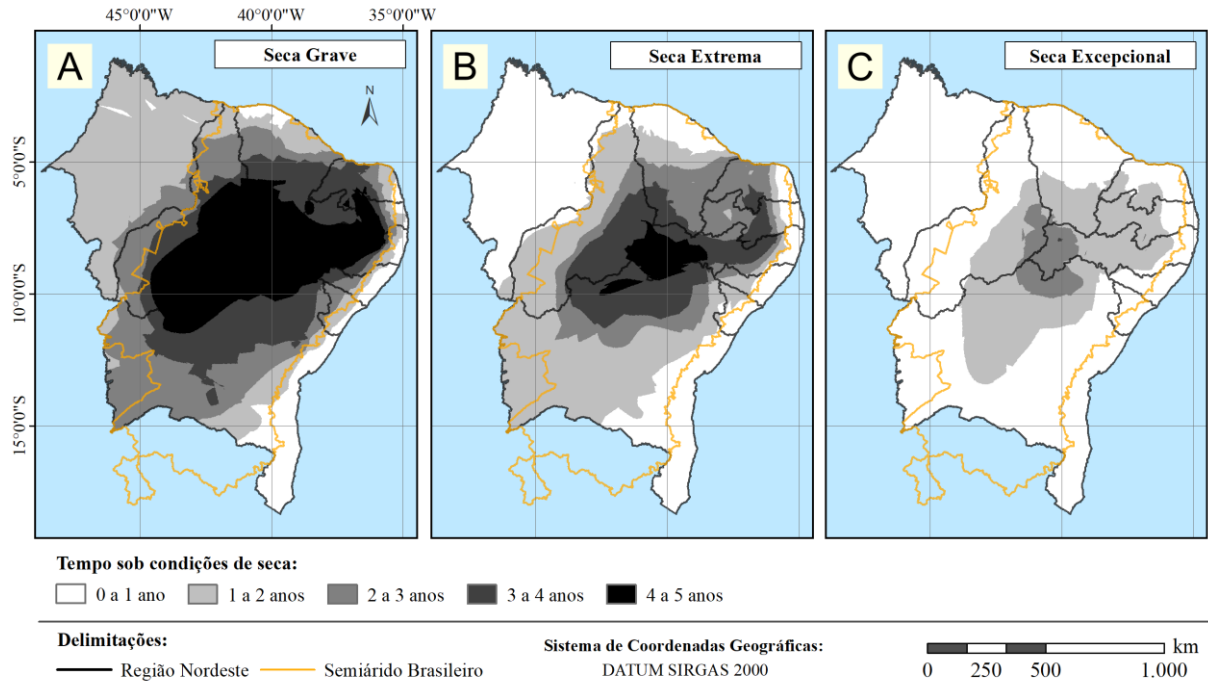
6.4 ABORDAGEM CUMULATIVA E INTEGRADA DE SECAS PLURIANUAIS

O Monitor de Secas do Brasil (MSB) é um produto para acompanhamento contínuo do grau de severidade das secas no país, com base em indicadores climáticos e impactos causados pelo fenômeno a curto e longo prazo (MARTINS et al., 2015). No MSB, cada classe de seca está associada a seus impactos de seca. Nesse contexto, a Abordagem Cumulativa de Secas proposta por Brito et al. (2021) consiste em incorporar todos os resultados mensais do MSB em um único produto, que expressa a seca em uma perspectiva plurianual.

Essa abordagem utilizou as três tipologias mais graves de seca presentes no MSB: secas severas, extremas e excepcionais. Essa seleção se deve aos níveis de maior impacto, como a restrição hídrica (seca severa) e a criação de estados de emergência (seca excepcional). Foram utilizados dados mensais, de julho de 2014 a junho de 2019, totalizando 5 anos de análise de secas, submetidos a operações de análise espacial e consequente estruturação de mapas de secas acumuladas.

No mapa resultante (Figura 18), os valores contidos nos pixels variam entre 0 e 60 (referente a quantidade de meses), onde “0” significa que o pixel em uma área que não sofreu nenhuma seca severa durante qualquer um dos meses dentro da análise de intervalo de tempo (de 5 anos). Por outro lado, o valor “60” expressa que a área foi severamente crítica durante todo o período de revisão de 5 anos, ininterruptamente.

Figura 18 – Mapas resultantes da abordagem de seca cumulativa para o Nordeste Brasileiro. Da intensidade mais baixa à mais alta estão: (A) seca severa, (B) seca extrema e (C) seca excepcional.



Fonte: Adaptado de Brito et al. (2021).

A abordagem cumulativa visa analisar a trajetória espacial e temporal de cada pixel e, conseqüentemente, determinar quais estão em condições de seca severa, extrema ou excepcional em diferentes períodos e o tempo de permanência e continuidade dessas condições. O estudo foi baseado na abordagem acumulada aplicada a 13 anos de mapas de seca dos Estados Unidos, desenvolvidos por Rufino et al. (2014).

6.5 METODOLOGIA

A metodologia elaborada neste capítulo visa adicionar uma quinta dimensão ao ISH, com o intuito de aprimorar o mapa de segurança hídrica previsto para o ano de 2035. Para a elaboração da dimensão, denominada de Dimensão de Risco, foi utilizado o produto de LULC da bacia do Alto Curso do Rio Paraíba, simulado no capítulo anterior, para o ano de 2035, e o Mapa Cumulativo de Secas, proposto por Brito et al. (2021).

A Dimensão de Risco tem como intuito adicionar ao ISH de 2035 indicadores capazes de quantificar o risco associado a segurança hídrica de cada ottobacia, através da relação entre o perigo e exposição, representados pela seca e antropização, respectivamente. A Figura 19 ilustra as cinco dimensões e os respectivos indicadores utilizados na elaboração do ISH ajustado (ISH_{ajust}).

Figura 19 – Dimensões e indicadores do ISH_{ajust}

DIMENSÃO	INDICADOR
HUMANA	Garantia de água para abastecimento Cobertura da rede de abastecimento
ECONÔMICA	Garantia de água para Irrigação e Pecuária Garantia de água para atividade Industrial
ECOSSISTÊMICA	Quantidade adequada de água para usos naturais Qualidade adequada de água para usos naturais Segurança de barragens de rejeito de mineração
RESILIÊNCIA	Reservação artificial Reservação natural Potencial de armazenamento subterrâneo Variabilidade pluviométrica
RISCO	Perigo associado a seca Exposição de áreas antropizadas

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (2019).

O perigo associado à seca foi quantificado de acordo com a quantidade de meses em que cada ottobacia registrou algum tipo de seca mais intensa (grave, extrema ou excepcional) durante 60 meses de análise, entre julho de 2014 e junho de 2019. Esse intervalo inclui uma das secas plurianuais mais longas já registrada pelo Semiárido Brasileiro, que estendeu-se de 2012 a 2018 (DANTAS; SILVA; SANTOS, 2020; PONTES FILHO et al., 2020). Foram analisadas três tipologias de seca: grave, extrema e excepcional; em que o menor grau registrado entre os três tipos determinou o grau de seca da ottobacia. A Tabela 13 relaciona a quantidade de meses com registro de seca e seu respectivo grau, este foi aferido com base no seu nível de severidade (registro de seca mais intensa) e período de tempo em que cada ottobacia registrou esse fenômeno, conforme a abordagem utilizada por Brito et al. (2021).

Tabela 13 – Quantidade de meses em cada tipologia de seca e seu respectivo grau associado

Grau de Seca	Seca Excepcional	Seca Extrema	Seca Grave
1	≥ 10 meses	≥ 20 meses	≥ 30 meses
2	7 a 9 meses	14 a 19 meses	21 a 29 meses
3	4 a 6 meses	8 a 13 meses	12 a 20 meses
4	1 a 3 meses	2 a 7 meses	3 a 11 meses
5	Nenhum registro	≤ 1 mês	≤ 2 meses

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por sua vez, a exposição de áreas antropizadas foi obtida a partir da porcentagem de área antropizada em cada ottobacia. Para isso, utilizou-se o mapa de LULC de 2035 e, a partir da quantificação das áreas antropizadas observada no cenário simulado, por meio de estatísticas zonais em ambiente SIG, obteve-se a porcentagem por ottobacia. Por fim, a porcentagem de área antropizada simulada foi associada a um grau de antropização, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Porcentagem de área antropizada e seu respectivo grau associado

Grau de Antropização	Porcentagem de área antropizada (2035)
5	0 a 20%
4	20,01 a 40%
3	40,01 a 60%
2	60,01 a 80%
1	80,01 a 100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo do valor da Dimensão de Risco, utilizou-se os graus de seca e antropização, seguindo uma matriz de classificação, conforme utilizado no PNSH para quantificar graus de risco (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019b). A classificação dos valores segue uma ordem inversa às utilizadas nas demais dimensões, indo de um risco máximo (valor 1) até um risco considerado mínimo (valor 5). Dessa forma, o valor 1 representa uma ottobacia que, em 2035, irá apresentar uma porcentagem de antropização superior a 60% e conviveu, no mínimo, sete meses com algum tipo de seca (grave, extrema ou excepcional). Por outro lado, o valor 5 indica uma ottobacia com menos de 40% de sua área ocupada por atividades antrópicas e com registro de secas de, no máximo, 11 meses.

Tabela 15 – Valor da dimensão de risco em função dos graus de seca e antropização

Grau de Seca	Grau de Antropização				
	1	2	3	4	5
1	1	1	2	2	3
2	1	2	2	3	3
3	2	2	3	3	4
4	2	3	3	4	5
5	3	3	4	5	5

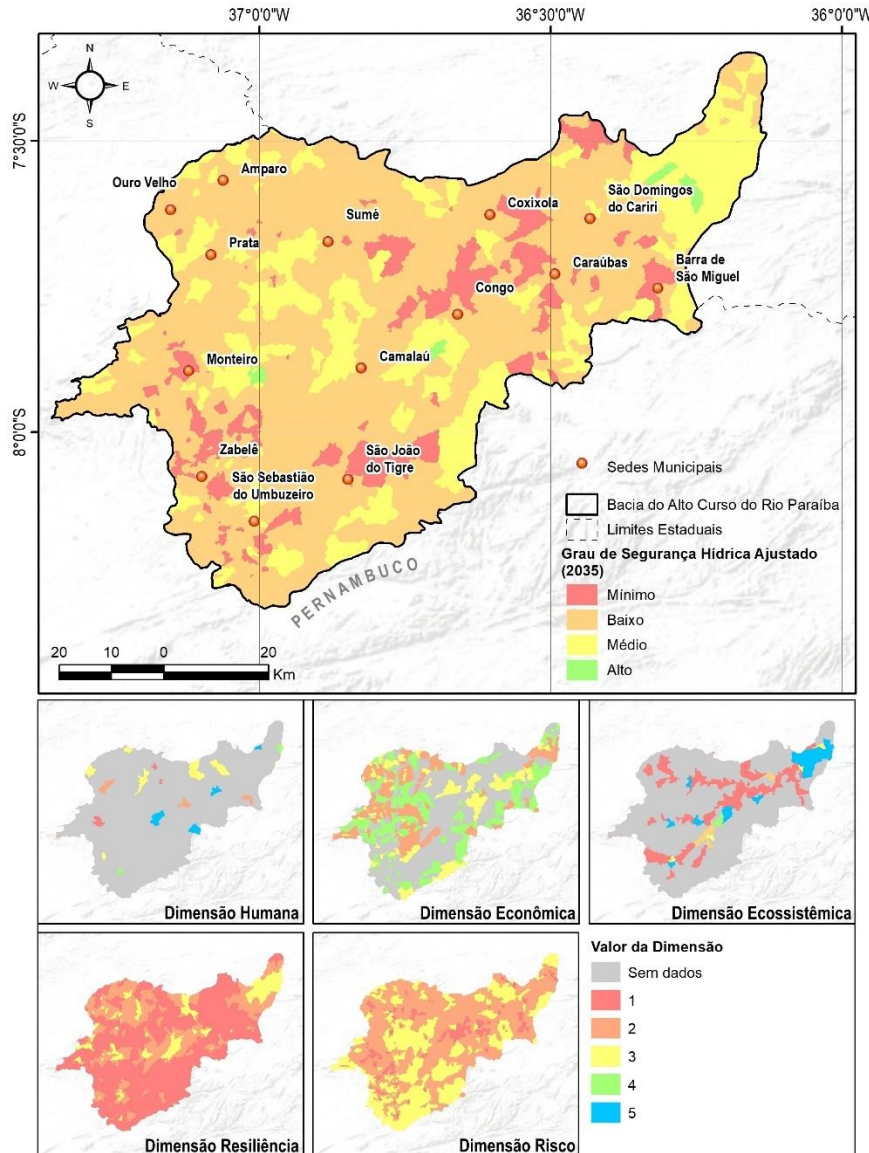
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o ISH_{ajust} foi calculado em ambiente SIG, a partir da álgebra de mapas entre as cinco dimensões. O grau de segurança hídrica foi o resultado da média simples entre os

valores de cada uma das dimensões. Os cálculos foram realizados para cada ottobacia e as dimensões que apresentam valor nulo, ou seja, que não possuíram informações suficientes para seu cálculo, não participaram da média.

6.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme mencionado, a construção do ISH_{ajust} foi resultante da relação entre as cinco dimensões analisadas (humana, econômica, ecossistêmica, resiliência e risco). A Figura 20 ilustra o ISH_{ajust} e todas as dimensões utilizadas para sua elaboração na área piloto. Ainda na figura em questão, foi possível constatar a carência de informações em algumas dimensões da região, principalmente a humana e a ecossistêmica, onde mais de 50% da bacia não possui dados que possibilitem a quantificação das dimensões supracitadas. As dimensões de resiliência e risco, por outro lado, possuem dados para toda a região, uma vez que estas são compostas por produtos derivados de levantamentos feitos por sensoriamento remoto, as quais conseguem abranger o território semiárido em sua totalidade.

Figura 20 – Dimensões e ISH_{ajust} para a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante da ausência de dimensões para algumas áreas, diversas ottobacias têm o seu ISH representado apenas pelas informações da Dimensão Resiliência (única que originalmente possui dados para todo o semiárido). Segundo informações contidas no PNSH, as dimensões humana e econômica permitem quantificar os déficits de atendimento às demandas efetivas (abastecimento humano e setor produtivo) e riscos associados, entretanto, pela falta de informações, essa análise acaba não contemplando todo o território brasileiro.

Segundo Ogata et al. (2016), a região do Alto Paraíba necessita de atenção no acesso ao abastecimento de água e esgotamento sanitário, além de melhorias na garantia dos usos

múltiplos. Dessa forma, a carência de dados para a elaboração da Dimensão Humana em diversas ottobacias do semiárido omite um dos principais problemas enfrentados pela população: a dificuldade de acesso à água potável.

No contexto do ISH, a Dimensão Econômica busca valorar os riscos dos setores econômicos que fazem uso de recursos hídricos no território nacional. No Semiárido Brasileiro, o Censo Agropecuário de 2017 identifica 1,83 milhão de estabelecimentos agropecuários dos quais, aproximadamente 79%, são caracterizados como de agricultura familiar – um dos segmentos da população brasileira mais vulnerável às mudanças e às variabilidades climáticas (IBGE, 2019). Nesse caso, a vulnerabilidade da produção agrícola nesse segmento é estrutural e se intensifica durante os períodos de estiagem. Contudo, os indicadores utilizados para a elaboração da Dimensão Econômica não consideram a sazonalidade dos fenômenos de estiagem no semiárido.

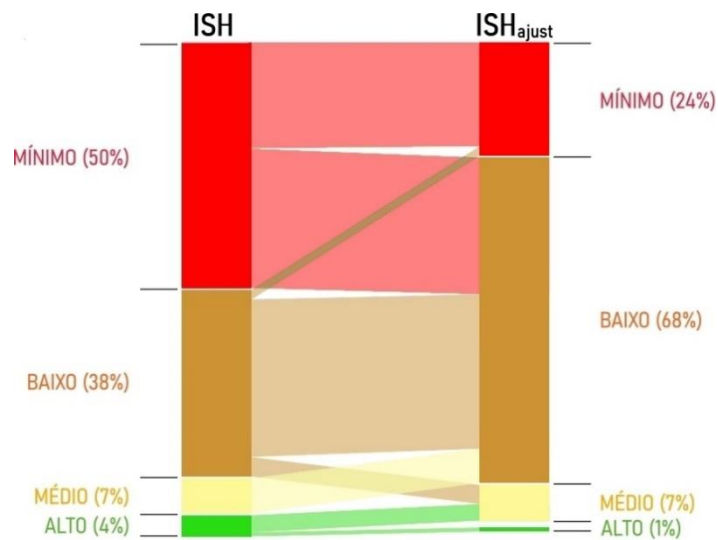
A Dimensão Ecosistêmica mensura condições minimamente saudáveis para o meio ambiente, associados a determinados trechos de rio. Diante disto, as ottobacias mensuradas estão localizadas próximas ao Rio Paraíba e fornecem graus de segurança hídrica que variam entre mínimos e máximos ao longo do rio. Essa dimensão também avalia a segurança das barragens de rejeitos de mineração, entretanto, o estado da Paraíba não possui nenhuma barragem com essa finalidade.

A quarta dimensão originalmente presente no ISH, denominada de Resiliência, busca retratar os níveis de segurança hídrica relacionados à ocorrência de eventos críticos de secas e fornece dados para todas as ottobacias do semiárido. No entanto, essa dimensão trata a seca como um fenômeno que se manifesta de maneira homogênea, onde os impactos sobre diferentes atores sociais ocorrem de forma uniforme, com base na capacidade de reservação da ottobacia e sua variabilidade pluviométrica.

Nesse âmbito, a Dimensão de Risco visa agregar informações à abordagem de risco presente no ISH, baseada na demanda e oferta de água, ao considerar o perigo associado à seca e a exposição que a população está submetida na região. A dimensão em questão considera todas as áreas de uso antrópico, visto que agrega as seis classes resultantes da atuação humana presentes no MapBiomias (agricultura, aquicultura, mosaico de agricultura e pastagem, mineração, pastagem e infraestrutura urbana), expostas a diferentes graus de seca. O valor da dimensão variou entre 1 e 3 no Alto Paraíba, e identificou um maior risco na porção central da região, nas proximidades da sede municipal do Congo.

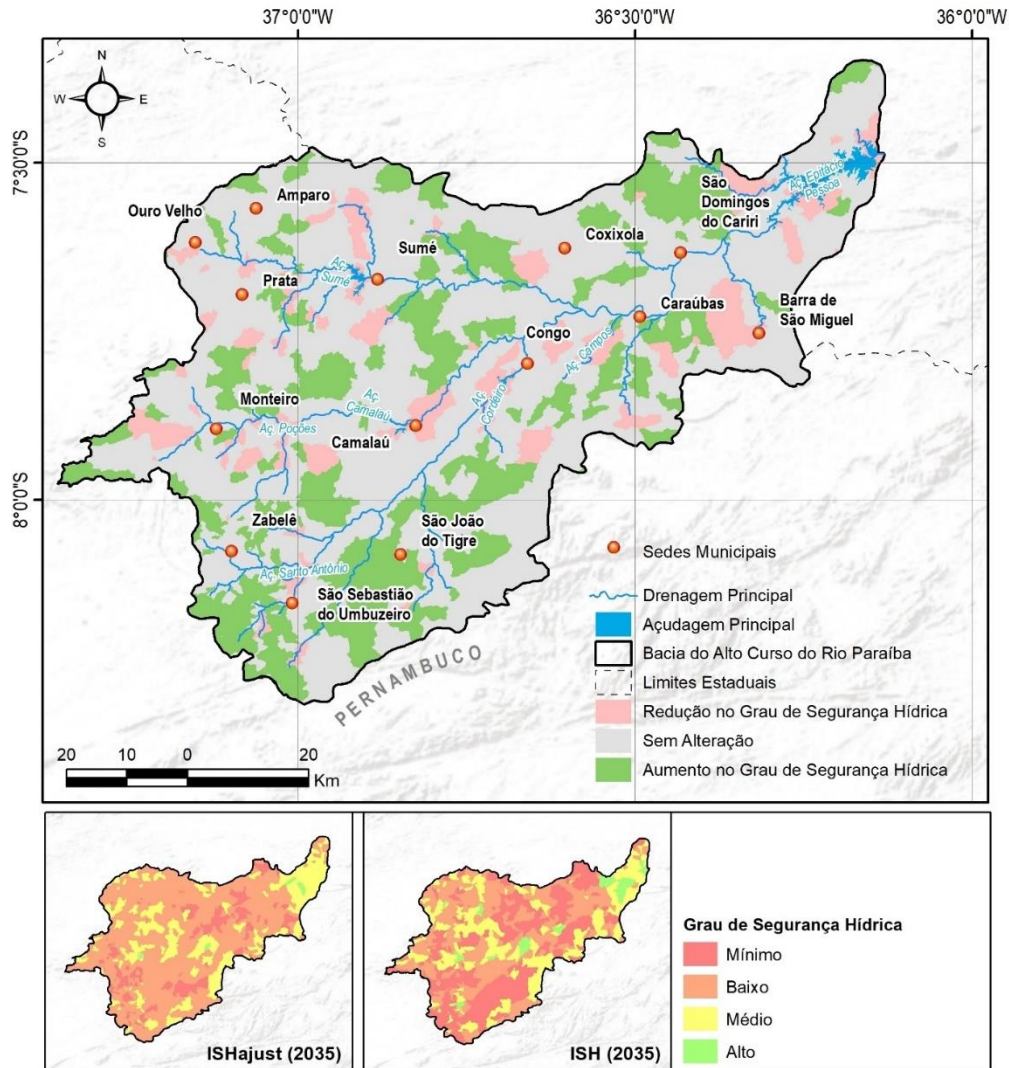
A partir do incremento da Dimensão de Risco, diversas ottobacias tiveram seu grau de segurança hídrica alterado. A Figura 21 ilustra a porcentagem de ottobacias, por grau de segurança hídrica, do ISH e ISH_{ajust} na bacia do Alto Curso do Rio Paraíba. O gráfico de transição revela a diminuição do grau mínimo e consequente aumento do grau baixo, além da diminuição da porcentagem de ottobacias classificadas com grau alto. Dessa forma, nota-se a redução dos graus extremos (mínimo e alto) que, na maioria das vezes, era resultante do cálculo do ISH com valores de apenas uma dimensão.

Figura 21 – Gráfico de transição entre as classes de segurança hídrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme exposto, as ottobacias do ISH sofreram alterações de até um grau de segurança hídrica. A espacialização das mudanças ocorridas na bacia encontra-se na Figura 22. As ottobacias próximas aos quatro maiores reservatórios superficiais da região (Epitácio Pessoa, Cordeiro, Poções e Sumé) apresentaram uma redução no grau de segurança hídrica, o que evidencia a antropização decorrente das atividades agropecuárias nas proximidades dos açudes.

Figura 22 – Diferença entre os graus de segurança hídrica do ISH_{ajust} e ISH 

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os açúdes situados nessa bacia, responsáveis pelo abastecimento da maior parte da população que habita a região, sofreram com o período de estiagem e, gradativamente, apresentaram o problema enfrentado pela maioria das barragens do Semiárido Brasileiro entre 2012 e 2016: diminuições contínuas dos volumes de água armazenada. O consumo de água na região nesse período permaneceu estável, visto que não houve um aumento significativo na população ou nas atividades industriais e econômicas que pudessem ter contribuído para essas reduções (DANTAS; SILVA; SANTOS, 2020). Conseqüentemente, as reduções no volume de água armazenada podem ser justificadas pela seca registrada na região, que ocasionou inúmeros prejuízos na agricultura e pecuária.

Nesse contexto, o ISH_{ajust} reforça a discussão que a presença de reservatórios não garante, necessariamente, a segurança hídrica de uma região (MULLER, 2015; POFF et al., 2016; RÊGO et al., 2017; REUSS, 2005). O planejamento de infraestruturas hídricas resilientes para atingir os objetivos sociais, econômicos e ambientais em um futuro altamente incerto apresenta inúmeros desafios. Fato que evidencia a necessidade de efetivar uma gestão mais sustentável da água nas cidades (por meio de incentivos ao reuso de águas) e em reservatórios localizados no semiárido, para combinar os princípios de projeto de engenharia com os requisitos do ecossistema, no contexto de eventos não estacionários (mudanças climáticas, uso da água, crescimento populacional e mudança no uso da terra).

6.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos durante esta pesquisa apontam para uma possibilidade de um maior refinamento no conceito de risco adotado na elaboração do ISH, principalmente para regiões de maior vulnerabilidade climática e social, como é o caso do Semiárido Brasileiro. Nesses locais, o risco transcende quantificações de oferta e demanda de água e afeta diretamente o desenvolvimento humano, político e econômico da população, impactando todas as ações humanas que ocorrem na região e, conseqüentemente, sua segurança hídrica.

Além disso, ressalta-se a necessidade de novos levantamentos socioeconômicos no território brasileiro, a fim de se obter dados mais precisos para os indicadores presentes nas dimensões humana, econômica e ecossistêmica. A ausência de dados dificulta a mensuração da segurança hídrica em diversas áreas, e conforme apresentado, resulta em graus de segurança hídrica que não representam a realidade do local. Nesse contexto, a utilização de indicadores elaborados a partir de ferramentas que empregam o sensoriamento remoto facilitam o levantamento de dados, principalmente em áreas de difícil acesso.

Por conseguinte, as discussões e resultados obtidos ao longo deste capítulo não descredibilizam o ISH produzido pela ANA, pelo contrário, a elaboração de um índice dessa categoria exige ferramentas e análises complexas, além de inúmeras limitações computacionais, em virtude da dimensão do território brasileiro, que foram extremamente bem executadas pela agência. Dessa forma, o ISH, assim como todo o levantamento presente no PNSH, apresenta contribuições inestimáveis para medidas de planejamento, execução, operação e manutenção voltadas a segurança hídrica brasileira.

Nesse sentido, é imprescindível que a segurança hídrica estimada para 2035 leve em consideração, além das modificações da Dimensão Humana, outros produtos preditivos. O ISH_{ajust} adiciona ao ISH indicadores para a localização espacial de mudanças no LULC e perigos associados a seca, o que o torna um índice mais robusto e capaz de representar a segurança hídrica de forma mais coerente em otobacias que carecem de dados, ao abranger análises já propostas nos capítulos anteriores.

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados no Capítulo IV, pode-se concluir que a elaboração de cenários futuros com ênfase em recursos hídricos deve analisar as diversas escalas de influência entre os atores envolvidos e definir a esfera de atuação desses modelos, uma vez que o sistema é altamente complexo e vai muito além de aspectos hidrológicos. Vale salientar que o estudo focou em variáveis e atores considerados essenciais ao sistema hídrico da região semiárida como um todo, tornando a inserção de novas variáveis e atores totalmente plausíveis à medida que o estudo é realizado em maior escala.

O Capítulo V apresentou a possibilidade de uma modelagem preditiva do uso da terra em larga escala, que foi possibilitada pela disponibilidade de produtos LULC, como a coleção MapBiomass, que engloba todo o território brasileiro. Os resultados podem ampliar as possibilidades de modelagem hidrológica, urbana e social no contexto brasileiro. Muitos dos modelos hidrológicos usados em planos estaduais e regionais de bacias hidrográficas atualmente utilizam apenas cenários observados de uso da terra. Cenários baseados em tendências e com alta precisão espacial pode gerar dados para fluxos de escoamento futuros e transporte de sedimentos. Sendo assim, simular as condições hidrológicas futuras é uma ferramenta inteligente para melhorar o planejamento dos recursos hídricos.

Os cenários de LULC futuros identificam a composição e hidrologia na bacia hidrográfica a montante e a jusante, capaz de modificar o escoamento superficial e subterrâneo na bacia hidrográfica a jusante, o que constitui ferramentas valiosas para modelagem de simulações hidrológicas distribuídas e semi-distribuídas. A integração entre esses modelos pode melhorar significativamente a eficiência de previsões hidrológicas, proporcionando previsões mais realistas ao considerar a expansão humana no território.

Tal fato torna-se evidente no decorrer do Capítulo VI, onde a cenarização futura do ISH carece de produtos preditivos, uma vez que apenas a Dimensão Humana é ajustada para representar o cenário futuro. É imprescindível que, em um país em desenvolvimento, marcado por conflitos pelo uso da água e da terra, e por fenômenos climáticos extremos, os impactos

ocasionados pela expansão do agronegócio e demais atividades antrópicas a longo prazo não sejam consideradas no cálculo da segurança hídrica.

Acredita-se que os resultados gerados nesta pesquisa possam contribuir para um dos principais desafios para a gestão racional dos recursos hídricos, que é fornecer uma abordagem preditiva capaz de auxiliar os planejadores e tomadores de decisão na solução de problemas complexos, capaz de considerar os diversos grupos de interesse que são confrontados por condições incertas em constante mudança. O gerenciamento do futuro ocorrerá necessariamente em um contexto adaptativo; dessa forma, planos de monitoramento e avaliações preditivas dos fenômenos que impactam os recursos hídricos serão necessárias para garantir que as decisões se baseiem nas melhores informações disponíveis.

7.2 RECOMENDAÇÕES

A abordagem integrada da Prospectiva Estratégica realizada no Capítulo IV resultou na análise de variáveis e atores envolvidos na disponibilidade hídrica do Semiárido Brasileiro. A partir desses resultados, torna-se possível realizar uma análise morfológica, com a utilização do software Morphol, capaz de varrer o campo das possibilidades através de regras de exclusão e critérios de seleção.

Tendo em vista que, em alguns intervalos de tempo, os resultados podem ser menos precisos que o esperado, o modelo utilizado no Capítulo V pode ser ainda mais refinado. A partir de novas variáveis explicativas que levem em consideração variáveis e atores do sistema, integrando essas análises de forma mais incisiva no modelo; novos métodos de calibração podem ser testados para fornecer dados mais confiáveis para regiões semiáridas e posteriormente, para outras áreas do país.

Por utilizar um modelo de CA disponível em código aberto, a metodologia apresentada pode ser replicada através dos mapas fornecidos pelo MapBiomas para outras bacias hidrográficas brasileiras. Vale salientar que o modelo de CA utilizado não considera a recuperação de áreas degradadas, dessa forma, em determinados locais que possuam iniciativas de reestruturação do ambiente natural, o modelo poderá não representar satisfatoriamente a realidade.

Com base nas discussões levantadas no Capítulo VI, com as inúmeras variáveis presentes no Semiárido Brasileiro, novas pesquisas podem se concentrar em inserir novos

indicadores as dimensões de segurança hídrica já existentes, com base em dados modelados e observados. Um exemplo de indicador a ser utilizado é a vulnerabilidade social, com base em dados censitários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELL, R.; THIEME, M. L.; REVENGA, C.; BRYER, M.; KOTTELAT, M.; BOGUTSKAYA, N.; COAD, B.; MANDRAK, N.; BALDERAS, S. C.; BUSSING, W.; et al. Freshwater Ecoregions of the World: A New Map of Biogeographic Units for Freshwater Biodiversity Conservation. **BioScience**, v. 58, n. 5, p. 403–414, mai. 2008.
- AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. **GeoPortal AESA**. Disponível em: <<http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/index.php>>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- ALMEIDA, C. M.; GLERIANI, J. M.; CASTEJON, E. F.; SOARES-FILHO, B. S. Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 9, p. 943–963, set. 2008.
- ALNSOUR, J. A. Managing urban growth in the city of Amman, Jordan. **Cities**, v. 50, p. 93–99, fev. 2016.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Agência Nacional de Águas e Ministério do Meio Ambiente começam a Formular Novo Plano Nacional de Recursos Hídricos. **Portal da Agência Nacional de Águas**, 2018. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/noticias/agencia-nacional-de-aguas-e-ministerio-do-meio-ambiente-comecam-a-formular-novo-plano-nacional-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 7 nov. 2019.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Índice de Segurança Hídrica: Manual Metodológico**. 1. ed. Brasília: ANA, 2019b.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. 1. ed. Brasília: ANA, 2019a.
- ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; MILLER, A. D.; MOHAN, J. E.; HUDIBURG, T. W.; DUVAL, B. D.; DELUCIA, E. H. Altered dynamics of forest recovery under a changing climate. **Global Change Biology**, v. 19, n. 7, p. 2001–2021, jul. 2013.
- ANDRADE, A. J. P. DE; SOUZA, C. R. DE; SILVA, N. M. DA. A vulnerabilidade e a resiliência da agricultura familiar em regiões semiáridas: o caso do Seridó Potiguar. **CAMPO-TERRITÓRIO: revista de geografia agrária**, v. 8, n. 15, 2013.
- ANDRADE, J. A. DE; NUNES, M. A. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista Espinhaço**, v. 3, n. 2, p. 28–39, 2014.
- ANGELOTTI, F.; SIGNOR, D.; GIONGO, V. Mudanças climáticas no Semiárido brasileiro: experiências e oportunidades para o desenvolvimento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 484–495, 2015.

- ARAÚJO, J. C. DE; DÖLL, P.; GÜNTNER, A.; KROL, M.; ABREU, C. B. R.; HAUSCHILD, M.; MENDIONDO, E. M. Water Scarcity Under Scenarios for Global Climate Change and Regional Development in Semiarid Northeastern Brazil. **Water International**, v. 29, n. 2, p. 209–220, jun. 2004.
- AZEVEDO, D. C. F DE. Água: importância e gestão no semiárido nordestino. **POLÊMICA**, v. 11, n. 1, p. 74–81, 2012.
- AZZARI, G.; LOBELL, D. B. Landsat-based classification in the cloud: An opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 64–74, dez. 2017.
- BARREIRA-GONZÁLEZ, P.; BARROS, J. Configuring the neighbourhood effect in irregular cellular automata based models. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 31, n. 3, p. 617–636, 4 mar. 2017.
- BATES, B.; KUNDZEWICZ, Z. W.; WU, S.; PALUTIKOF, J. **Climate Change and Water**. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva: IPCC Secretariat, 2008.
- BATTY, M. Cellular Automata and Urban Form: A Primer. **Journal of the American Planning Association**, v. 63, n. 2, p. 266–274, 30 jun. 1997.
- BATTY, M.; XIE, Y. From Cells to Cities. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 21, n. 7, p. S31–S48, 22 dez. 1994.
- BEZERRA, A. P. **Governança de água para distintos níveis de planejamento no Semiárido da Paraíba: análise para o período 2012-2018**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 126. 2019.
- BEZERRA, N. F. Água no semiárido nordestino experiências e desafios. In: HOFMEISTER, W. (Ed.). **Água e Desenvolvimento Sustentável no Semiárido**. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002. p. 35–52.
- BISWAS, A. K. Integrated Water Resources Management: A Reassessment. **Water International**, v. 29, n. 2, p. 248–256, jun. 2004.
- BOGARDI, J. J.; DUDGEON, D.; LAWFORD, R.; FLINKERBUSCH, E.; MEYN, A.; PAHL-WOSTL, C.; VIELHAUER, K.; VÖRÖSMARTY, C. Water security for a planet under pressure: interconnected challenges of a changing world call for sustainable solutions. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 35–43, fev. 2012.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. 1. ed. Ottawa: Pergamon, 2014.
- BRASIL (GOVERNO FEDERAL). **Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/documents/10157/3675235/RIMA+JULHO+2004.pdf/78989068-cf76-4ab5-bf01->

3b45473db 7f9>. Acesso em: 25 out. 2019.

BRASIL. **Lei Complementar nº 125, de 3 de janeiro de 2007. Institui, na forma do art. 43 da Constituição Federal, a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE**, 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp125.htm>

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21**, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>

BRASILEIRO, R. S. **Alternativas de desenvolvimento sustentável no semiárido nordestino: da degradação à conservação**. v. 5, n. 5, 2009.

BRITO, L. DE L.; SILVA, A. DE S.; PORTO, E. R. Disponibilidade de água e a gestão dos recursos hídricos. In: EMBRAPA (Ed.). **Embrapa Semiárido**. 2007. p. 15–32.

BRITO, Y. M. A.; RUFINO, I. A. A.; BRAGA, C. F. C.; MULLIGAN, K. The Brazilian drought monitoring in a multi-annual perspective. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 1, p. 31, 5 jan. 2021.

BRONSTERT, A.; JAEGER, A.; GUNTNER, A.; HAUSCHILD, M.; DÖLL, P.; KROL, M. Integrated modelling of water availability and water use in the semi-arid Northeast of Brazil. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 25, n. 3, p. 227–232, jan. 2000.

BURROUGH, P. A. Dynamic modelling and geocomputation. In: **Geocomputation: a primer**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1998. p. 165–192.

BURSZTYN, M.; CHACON, S. S. Ligações perigosas: proteção social e clientelismo no Semiárido Nordeste. **Estudos Sociedade e Agricultura**, 2011.

BURTON, I. Vulnerability and adaptive response in the context of climate and climate change. **Climatic change**, v. 36, n. 1–2, p. 185–196, 1997.

CAMPOS, J. N. B. Paradigms and Public Policies on Drought in Northeast Brazil: A Historical Perspective. **Environmental Management**, v. 55, n. 5, p. 1052–1063, mai. 2015.

CARLSON, T. N. ANALYSIS AND PREDICTION OF SURFACE RUNOFF IN AN URBANIZING WATERSHED USING SATELLITE IMAGERY. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 4, p. 1087–1098, ago. 2004.

CARVALHO, L. A.; ESPINDULA, D. H. P. Vozes da seca: representações da transposição do Rio São Francisco. **Arquivos Brasileiros de Psicologia**, v. 66, n. 1, p. 135–151, 2014.

CHEN, B.; XIAO, X.; LI, X.; PAN, L.; DOUGHTY, R.; MA, J.; DONG, J.; QIN, Y.; ZHAO, B.; WU, Z.; SUN, R.; LAN, G.; XIE, G.; CLINTON, N.; GIRI, C. A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. **ISPRS Journal of Photogrammetry**

- and Remote Sensing**, v. 131, p. 104–120, set. 2017.
- CHEN, L.; HUANG, Z.; GONG, J.; FU, B.; HUANG, Y. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. **CATENA**, v. 70, n. 2, p. 200–208, jul. 2007.
- CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61–82, 2008.
- CONWAY, J. The game of life. **Scientific American**, v. 223, n. 4, p. 4, 1970.
- COOK, C.; BAKKER, K. Water security: Debating an emerging paradigm. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 1, p. 94–102, fev. 2012.
- CORREIA, J. DAS N. **Cenários de Impactos Socioambientais Rural, Urbano e Rurbano A Partir Do Canal De Transposição do Eixo Leste do Rio São Francisco em Monteiro-PB**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) - Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2019.
- CROUZEILLES, R.; SANTIAMI, E.; ROSA, M.; PUGLIESE, L.; BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R.; METZGER, J. P.; CALMON, M.; SCARAMUZZA, C. A. DE M.; MATSUMOTO, M. H.; PADOVEZI, A.; BENINI, R. DE M.; CHAVES, R. B.; METZKER, T.; FERNANDES, R. B.; SCARANO, F. R.; SCHMITT, J.; LUI, G.; CHRIST, P.; et al. There is hope for achieving ambitious Atlantic Forest restoration commitments. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, n. 2, p. 80–83, abr. 2019.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 111–124, 2008.
- CUNHA, J.; NÓBREGA, R. L. B.; RUFINO, I.; ERASMI, S.; GALVÃO, C.; VALENTE, F. Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: Evidence from the Brazilian Caatinga. **Remote Sensing of Environment**, p. 111250, jun. 2019.
- CURRY, E.; DEGELER, V.; CLIFFORD, E.; COAKLEY, D. **Linked water data for water information management**. In: 11th International conference on hydroinformatics (HIC). **Anais...2014**
- DANIELSSON, P.-E. Euclidean Distance Mapping. **Computer Graphics and image processing**, v. 14, n. 3, p. 227–248, 1980.
- DANTAS, J. C.; SILVA, R. M. DA; SANTOS, C. A. G. Drought impacts, social organization, and public policies in northeastern Brazil: a case study of the upper Paraíba River basin. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 5, p. 317, 28 mai. 2020.
- DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). **DNIT Portal**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais>>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- ELMORE, A. J.; MUSTARD, J. F.; HAMBURG, S. P.; MANNING, S. J. Agricultural Legacies

- in the Great Basin Alter Vegetation Cover, Composition, and Response to Precipitation. **Ecosystems**, v. 9, n. 8, p. 1231–1241, 19 dez. 2006.
- EMBRAPA, C. N. DE P. DE S. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 1999.
- EVANGELIDIS, K.; NTOUROS, K.; MAKRIDIS, S.; PAPATHEODOROU, C. Geospatial services in the Cloud. **Computers & Geosciences**, v. 63, p. 116–122, fev. 2014.
- FALAH, N.; KARIMI, A.; HARANDI, A. T. Urban growth modeling using cellular automata model and AHP (case study: Qazvin city). **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 6, n. 1, p. 235–248, 16 mar. 2020.
- FALKENMARK, M. Adapting to climate change: towards societal water security in dry-climate countries. **International Journal of Water Resources Development**, v. 29, n. 2, p. 123–136, jun. 2013.
- FANG, W.; HUANG, S.; HUANG, Q.; HUANG, G.; WANG, H.; LENG, G.; WANG, L.; GUO, Y. Probabilistic assessment of remote sensing-based terrestrial vegetation vulnerability to drought stress of the Loess Plateau in China. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, p. 111290, out. 2019.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. RG2004, 19 maio 2007.
- FITAWOK, M. B.; DERUDDER, B.; MINALE, A. S.; VAN PASSEL, S.; ADGO, E.; NYSSSEN, J. Modeling the Impact of Urbanization on Land-Use Change in Bahir Dar City, Ethiopia: An Integrated Cellular Automata–Markov Chain Approach. **Land**, v. 9, n. 4, p. 115, 9 abr. 2020.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- FOLHES, M. T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 10, p. 1398–1408, out. 2009.
- FOLLADOR, M.; PHILIPPIDIS, G.; DAVIS, J.; SOARES-FILHO, B. **Assessing the impacts of the EU bioeconomy on third countries, Potential environmental impacts in Brazil of EU biofuel demand to 2030**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2019.
- FRIGERIO, I.; DE AMICIS, M. Mapping social vulnerability to natural hazards in Italy: A suitable tool for risk mitigation strategies. **Environmental Science & Policy**, v. 63, p. 187–196, set. 2016.
- FURTADO, A. V. B. D.; SOUZA, DE P. O. J. Mapeamento geomorfológico para a bacia do

- Alto Curso do Rio Paraíba de acordo com as normas do Manual Geomorfológico do IBGE. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, p. 83–91, 2016.
- GAIN, A. K.; GIUPPONI, C.; WADA, Y. Measuring global water security towards sustainable development goals. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 12, p. 124015, 1 dez. 2016.
- GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAUJO, J. **Global change and regional impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid Northeast of Brazil**. Springer Science & Business Media, 2003.
- GALE, S.; OLSSON, G.; TOBLER, W. Cellular geography. In: **Philosophy in geography**. Dordrecht: Reidel, 1979. p. 379–386.
- GALLOPÍN, G. C. Three global water scenarios. **International Journal of water**, v. 1, n. 1, p. 16–40, 2000.
- GANT, R. L.; ROBINSON, G. M.; FAZAL, S. Land-use change in the ‘edgelands’: Policies and pressures in London’s rural–urban fringe. **Land Use Policy**, v. 28, n. 1, p. 266–279, jan. 2011.
- GARFÌ, M.; FERRER-MARTÍ, L.; BONOLI, A.; TONDELLI, S. Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes. A case study in semi-arid region of Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 3, p. 665–675, mar. 2011.
- GARJULLI, R. Os recursos hídricos no semi-árido. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 38–39, 2003.
- GHARBIA, S. S.; ALFATAH, S. A.; GILL, L.; JOHNSTON, P.; PILLA, F. Land use scenarios and projections simulation using an integrated GIS cellular automata algorithms. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 2, n. 3, p. 151, 8 set. 2016.
- GIDEY, E.; DIKINYA, O.; SEBEGO, R.; SEGOSEBE, E.; ZENEBE, A. Modeling the Spatio-temporal dynamics and evolution of land use and land cover (1984–2015) using remote sensing and GIS in Raya, Northern Ethiopia. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 4, p. 1285–1301, 29 dez. 2017.
- GIORDANO, M.; SHAH, T. From IWRM back to integrated water resources management. **International Journal of Water Resources Development**, v. 30, n. 3, p. 364–376, 3 jul. 2014.
- GLOBAL WATER PARTNERSHIP. **Towards Water Security: A Framework for Action**. Stockholm: GWP Secretariat, 2000.
- GODET, M.; DURANCE, P. **A prospectiva estratégica: para as empresas e os territórios**. DUNOD, 2011.
- GODET, M.; LESOURNE, J. P. **Crise de la prévision, essor de la prospective: exemples et méthodes**. Presses universitaires de France, 1977.

- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, dez. 2017.
- GOUNARIDIS, D.; CHORIANOPOULOS, I.; SYMEONAKIS, E.; KOUKOULAS, S. A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use/cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales. **Science of The Total Environment**, v. 646, p. 320–335, jan. 2019.
- GREY, D.; SADOFF, C. W. Sink or Swim? Water security for growth and development. **Water Policy**, v. 9, n. 6, p. 545–571, dez. 2007.
- GUIMARÃES JR, J. A. Reforma hídrica do Nordeste como alternativa à Transposição do Rio São Francisco. **Cadernos do CEAS: Revista crítica de humanidades**, v. 227, p. 80–88, 2016.
- GUNDA, T.; BENNEYWORTH, L.; BURCHFIELD, E. Exploring water indices and associated parameters: a case study approach. **Water Policy**, v. 17, n. 1, p. 98–111, fev. 2015.
- GUO, H.; WANG, L.; LIANG, D. Big Earth Data from space: a new engine for Earth science. **Science Bulletin**, v. 61, n. 7, p. 505–513, abr. 2016.
- HAGENLOCHER, M.; MEZA, I.; ANDERSON, C. C.; MIN, A.; RENAUD, F. G.; WALZ, Y.; SIEBERT, S.; SEBESVARI, Z. Drought vulnerability and risk assessments: state of the art, persistent gaps, and research agenda. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 8, p. 083002, 22 jul. 2019.
- HALL, J.; BORGOMEIO, E. Risk-based principles for defining and managing water security. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 2002, p. 20120407, 13 nov. 2013.
- HEIN, L.; DE RIDDER, N.; HIERNAUX, P.; LEEMANS, R.; DE WIT, A.; SCHAEPMAN, M. Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images. **Journal of Arid Environments**, v. 75, n. 11, p. 1164–1172, nov. 2011.
- HERMANNNS, T.; HELMING, K.; KÖNIG, H. J.; SCHMIDT, K.; LI, Q.; FAUST, H. Sustainability impact assessment of peatland-use scenarios: Confronting land use supply with demand. **Ecosystem Services**, v. 26, p. 365–376, 2017.
- HEWITT, R.; DÍAZ PACHECO, J.; MOYA GÓMEZ, B. **A cellular automata land use model for the R software environment (weblog)**. Disponível em: <<https://simlander.wordpress.com>>. Acesso em: 29 nov. 2019.
- HIRJI, R.; IBREKK, H. O. **Environmental and water resources management**. Washington, DC: World Bank, 2001.
- HOEKSTRA, A. Y.; BUURMAN, J.; VAN GINKEL, K. C. H. Urban water security: A review. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 5, p. 053002, 1 mai. 2018.

- HOPE, R.; ROUSE, M. Risks and responses to universal drinking water security. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 2002, p. 20120417, 13 nov. 2013.
- HUANG, H.; CHEN, Y.; CLINTON, N.; WANG, J.; WANG, X.; LIU, C.; GONG, P.; YANG, J.; BAI, Y.; ZHENG, Y.; ZHU, Z. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 166–176, dez. 2017.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Resultados definitivos. **Censo Agropecuário, Florestal e Aquícola 2017**. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html>. Acesso em: 13 dez. 2020.
- INSA - INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. Nova delimitação expande o Semiárido até o Maranhão: 73 novos municípios foram incluídos. **Portal INSA, 2017**. Disponível em: <<https://portal.insa.gov.br/noticias/1070-nova-delimitacao-expande-o-semiarido-ate-o-maranhao-73-novos-municipios-foram-incluidos#:~:text=Com o acréscimo das novas,demográfica de 25 hab%2Fkm².>>>. Acesso em: 29 dez. 2020.
- JACOBI, P. R.; FRANCALANZA, A. P. Comitês de bacias hidrográficas no Brasil: desafios de fortalecimento da gestão compartilhada e participativa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 11, 30 dez. 2005.
- KAMUSOKO, C. Importance of Remote Sensing and Land Change Modeling for Urbanization Studies. In: **Urban Development in Asia and Africa**. Singapore ed. Springer, 2017. p. 3–10.
- KANTAKUMAR, L. N.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. SUSM: a scenario-based urban growth simulation model using remote sensing data. **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, n. sup2, p. 26–41, 9 ago. 2019.
- KAŹMIERCZAK, A.; CAVAN, G. Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. **Landscape and Urban Planning**, v. 103, n. 2, p. 185–197, nov. 2011.
- KESHTKAR, H.; VOIGT, W. A spatiotemporal analysis of landscape change using an integrated Markov chain and cellular automata models. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 2, n. 1, p. 10, 23 mar. 2016.
- KHAN, D. M.; VEERBEEK, W.; CHEN, A. S.; HAMMOND, M. J.; ISLAM, F.; PERVIN, I.; DJORDJEVIĆ, S.; BUTLER, D. Back to the future: assessing the damage of 2004 Dhaka flood in the 2050 urban environment. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. S43–S54, jan. 2018.
- KHORRAM, S.; VAN DER WIELE, C. F.; KOCH, F. H.; NELSON, S. A. C.; POTTS, M. D. Terrestrial Applications of Remote Sensing. In: **Principles of Applied Remote Sensing**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 125–176.
- KROL, M. .; JAEGER, A.; BRONSTERT, A.; KRYWKOW, J. The semi-arid integrated model

- (SIM), a regional integrated model assessing water availability, vulnerability of ecosystems and society in NE-Brazil. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 26, n. 7–8, p. 529–533, jan. 2001.
- KRON, W. Keynote lecture: Flood risk= hazard× exposure× vulnerability. In: **Flood defence**. New York: Science Press, 2002. p. 82–97.
- LAUTZE, J.; MANTHRITHILAKE, H. Water security: Old concepts, new package, what value? **Natural Resources Forum**, v. 36, n. 2, p. 76–87, maio 2012.
- LEMOS, M. C.; OLIVEIRA, J. L. F DE. Can Water Reform Survive Politics? Institutional Change and River Basin Management in Ceará, Northeast Brazil. **World Development**, v. 32, n. 12, p. 2121–2137, dez. 2004.
- LI, F.; WANG, L.; CHEN, Z.; CLARKE, K. C.; LI, M.; JIANG, P. Extending the SLEUTH model to integrate habitat quality into urban growth simulation. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 486–498, jul. 2018.
- LI, X.; YEH, A. G. O. Cellular automata modelling for urban planning in fast-growth regions. In: **Handbook of Planning Support Science**. Edward Elgar Publishing, 2020. p. 397–415.
- LI, X.; YEH, A. G.-O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 2, p. 131–152, 13 mar. 2000.
- LIBANIO, P. A. C. Water reforms in Brazil: Challenges and opportunities for promoting water security in a continental-sized country. **World Water Policy**, p. 12042, 10 dez. 2020.
- LIU, Y.; HU, Y.; SU, M.; MENG, F.; DANG, Z.; LU, G. Multiregional input-output analysis for energy-water nexus: A case study of Pearl River Delta urban agglomeration. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121255, jul. 2020.
- LOBÃO, J. S. B.; FRANCA ROCHA, W. DE J. S.; FREITAS, N. B. **Semi-árido da Bahia, limites físico ou sócio-político? Uma abordagem geotecnológica para a delimitação oficial**. In: Anais do II Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. **Anais...Aracajú**: 2014.
- LONDE, L. DE R.; COUTINHO, M. P.; DI GREGÓRIO, L. T.; SANTOS, L. B. L.; SORIANO, É. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 133–152, dez. 2014.
- LOUIS, P.-Y.; NARDI, F. R. **Probabilistic Cellular Automata**. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 27
- MACDONALD, G. M. Water, climate change, and sustainability in the southwest. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 50, p. 21256–21262, 14 dez. 2010.
- MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios.

- Ambiente & Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 121–136, 2003.
- MADIN, E. M. P.; DILL, L. M.; RIDLON, A. D.; HEITHAUS, M. R.; WARNER, R. R. Human activities change marine ecosystems by altering predation risk. **Global Change Biology**, v. 22, n. 1, p. 44–60, jan. 2016.
- MAIA JÚNIOR, G. N.; MATA, B. D. DA; FILHO, D. L. DE A.; LEAL, C. F.; BARBOSA, M. S.; KOHLER, M. C. M.; HARKOT, P. F. G.; ROCHA, M. DAS V. L.; FILHO, A. G.; SILVA, K. G. DA; MOURA, E.-E. L. DE; CARVALHO, C.; AQUINO, F. T. M. DE. Margens Nuas: As Nascentes e o Alto Curso do Rio Paraíba. **Paraiwa**, 2011. Disponível em: <<http://www.paraiwa.org.br/paraiba/alto.htm>>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- MAISONNAVE, F.; PRADO, A. **NordesteFolha de S. Paulo**, 2018. Disponível em: <<https://arte.folha.uol.com.br/ciencia/2018/crise-do-clima/nordeste/seca-historica-jadura-seis-anos-e-ameaca-tornar-se-regra-no-semiarido/>>. Acesso em: 3 maio. 2020.
- MAPBIOMAS PROJECT. **Collection [4.0] of the Annual Land Use Land Cover Maps of Brazil**. Disponível em: <mapbiomas.org>. Acesso em: 11 jan. 2020.
- MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, p. 49–54, 2016.
- MARTINS, E. S. P.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; BIAZETO, B.; SILVA, R. F. V.; ENGLE, N. L. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. The World Bank, 2015.
- MEDEIROS, L. DE C.; MATTOS, A.; LÜRLING, M.; BECKER, V. Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. **Aquatic Ecology**, v. 49, n. 3, p. 293–307, 3 set. 2015.
- MELLO-THERY, N. A. DE; LANDY, F.; ZÉRAH, M.-H. POLÍTICAS AMBIENTAIS COMPARADAS ENTRE PAÍSES DO SUL: pressão antrópica em áreas de proteção ambiental urbanas. **Mercator**, v. 9, n. 20, p. 197–215, 2010.
- MELLO-THERY, N. A. DE; LANDY, F.; ZÉRAH, M.-H. POLÍTICAS AMBIENTAIS COMPARADAS ENTRE PAÍSES DO SUL: pressão antrópica em áreas de proteção ambiental urbanas. **Mercator**, v. 9, n. 20, p. 197–215, 30 dez. 2010.
- MILHORANCE, C.; MENDES, P.; MESQUITA, P.; MORIMURA, M.; REIS, R.; RODRIGUES FILHO, S.; BURSZTYN, M. O desafio da integração de políticas públicas para a adaptação às mudanças climáticas no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.
- MONTENEGRO, A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 19, p. 2705–2723, 15 set. 2010.
- MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 434–435, p. 55–68, abr. 2012.

- MULLER, M. The 'Nexus' As a Step Back towards a More Coherent Water Resource Management Paradigm. **Water Alternatives**, v. 8, n. 1, p. 675–694, 2015.
- MULTSCH, S.; KROL, M. S.; PAHLOW, M.; ASSUNÇÃO, A. L. C.; BARRETTO, A. G. O. P.; DE JONG VAN LIER, Q.; BREUER, L. Assessment of potential implications of agricultural irrigation policy on surface water scarcity in Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 1, p. 307–324, 21 jan. 2020.
- MUSTAFA, A.; SAADI, I.; COOLS, M.; TELLER, J. A Time Monte Carlo method for addressing uncertainty in land-use change models. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 32, n. 11, p. 2317–2333, 2 nov. 2018.
- NEWLAND, C. P.; MAIER, H. R.; ZECCHIN, A. C.; NEWMAN, J. P.; VAN DELDEN, H. Multi-objective optimisation framework for calibration of Cellular Automata land-use models. **Environmental Modelling & Software**, v. 100, p. 175–200, fev. 2018.
- OGATA, I. S.; SANTOS, D. DE L.; MENESES, I. DE A.; OLIVEIRA, R. DE; RODRIGUES, A. C. L. **Aplicação do índice de pobreza hídrica na região hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba, Estado da Paraíba, Brasil**. In: Anais do VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Anais...Campina Grande: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016.
- OSIS, R.; LAURENT, F.; POCCARD-CHAPUIS, R. Spatial determinants and future land use scenarios of Paragominas municipality, an old agricultural frontier in Amazonia. **Journal of Land Use Science**, v. 14, n. 3, p. 258–279, 4 maio 2019.
- PAHL-WOSTL, C.; MOSTERT, E.; TÀBARA, D. The growing importance of social learning in water resources management and sustainability science. **Ecology and Society**, v. 13, n. 1, p. 24, 2008.
- PAHL-WOSTL, C.; TÀBARA, D.; BOUWEN, R.; CRAPS, M.; DEWULF, A.; MOSTERT, E.; RIDDER, D.; TAILLIEU, T. The importance of social learning and culture for sustainable water management. **Ecological Economics**, v. 64, n. 3, p. 484–495, jan. 2008.
- PAIVA, C. A. DE; OLIVEIRA, A. P. DE S.; MUNIZ, S. S.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, V. J. DOS; ALVES, S. DO C. Determination of the spatial susceptibility to Yellow Fever using a multicriteria analysis. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 114, 2019.
- PARNELL, S.; WALAWEGE, R. Sub-Saharan African urbanisation and global environmental change. **Global Environmental Change**, v. 21, p. S12–S20, dez. 2011.
- PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. **Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change IPCC, 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- PLATE, E. J. Sustainable Development of Water Resources: A Challenge to Science and Engineering. **Water International**, v. 18, n. 2, p. 84–94, 22 jun. 1993.

- POFF, N. L.; BROWN, C. M.; GRANTHAM, T. E.; MATTHEWS, J. H.; PALMER, M. A.; SPENCE, C. M.; WILBY, R. L.; HAASNOOT, M.; MENDOZA, G. F.; DOMINIQUE, K. C.; BAEZA, A. Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 25–34, 14 jan. 2016.
- PONTES FILHO, J. D.; SOUZA FILHO, F. DE A.; MARTINS, E. S. P. R.; STUDART, T. M. DE C. Copula-Based Multivariate Frequency Analysis of the 2012–2018 Drought in Northeast Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 834, 16 mar. 2020.
- PONTES, A. G. V.; GADELHA, D.; FREITAS, B. M. C.; RIGOTTO, R. M.; FERREIRA, M. J. M. Os perímetros irrigados como estratégia geopolítica para o desenvolvimento do semiárido e suas implicações à saúde, ao trabalho e ao ambiente. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 18, n. 11, p. 3213–3222, nov. 2013.
- RAMOS, C. J. P.; DE ALENCASTRO GRAÇA, P. M. L.; FEARNSSIDE, P. M. Deforestation Dynamics on an Amazonian Peri-Urban Frontier: Simulating the Influence of the Rio Negro Bridge in Manaus, Brazil. **Environmental Management**, v. 62, n. 6, p. 1134–1149, 1 dez. 2018.
- RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. DE O.; ALBUQUERQUE, J. DO P. T.; RIBEIRO, M. M. R.; NUNES, T. H. C. **A gestão de recursos hídricos e a transposição de águas do Rio São Francisco para o açude Epitácio Pessoa – Boqueirão**. In: Anais do XXII SBRH. Anais...Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017
- REUSS, M. Ecology, Planning, and River Management in the United States: Some Historical Reflections. **Ecology and Society**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2005.
- RIBOT, J. C.; MAGALHÃES, A. R.; PANAGIDES, S. **Climate variability, climate change and social vulnerability in the semi-arid tropics**. Cambridge University Press, 2005.
- RIMAL, B.; ZHANG, L.; KESHTKAR, H.; HAACK, B.; RIJAL, S.; ZHANG, P. Land Use/Land Cover Dynamics and Modeling of Urban Land Expansion by the Integration of Cellular Automata and Markov Chain. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 4, p. 154, 19 abr. 2018.
- ROCHA, R.; SOARES, R. R. Water scarcity and birth outcomes in the Brazilian semiarid. **Journal of Development Economics**, v. 112, p. 72–91, jan. 2015.
- ROMANO, S. T. Transforming participation in water governance: the multisectoral alliances of rural water committees and NGOs in Nicaragua. **International Journal of Water Resources Development**, v. 35, n. 3, p. 430–445, 4 mai. 2019.
- ROODPOSHTI, M. S.; HEWITT, R. J.; BRYAN, B. A. Towards automatic calibration of neighbourhood influence in cellular automata land-use models. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 79, p. 101416, jan. 2020.
- ROSA, M.; SHIMBO, J. Z.; AZEVEDO, T. **MapBiomias - Mapeando as transformações do território brasileiro nas últimas três décadas**. In: Anais do VIII Simpósio de Restauração Ecológica. Anais...São Paulo: Instituto de Botânica, 2019.

- ROUNSEVELL, M. D. A.; METZGER, M. J. Developing qualitative scenario storylines for environmental change assessment. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 1, n. 4, p. 606–619, jul. 2010.
- RUFINO, I. A. A.; GALVÃO, C. . O.; CUNHA, J. E. . B. L. Land-Use Land Cover Change and Forestry (LULCCF). In: LEAL FILHO, W. et al. (Eds.). . **Climate Action**. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- RUFINO, I.; DJORDJEVIĆ, S.; BRITO, H. C. DE; ALVES, P. B. R. Multi-Temporal Built-Up Grids of Brazilian Cities: How Trends and Dynamic Modelling Could Help on Resilience Challenges? **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 748, 14 jan. 2021.
- RUFINO, I.; MULLIGAN, K.; BARBATO, L.; SESHADRI, S. US Drought risk map: a cumulative approach from 2000 to 2012. In: **ESRI Map Book volume 29**. California: ESRI, 2014. p. 98–99.
- SABOURIN, E. Meio ambiente e sustentabilidade da agricultura familiar no semi-árido Nordeste. **Raízes, ano XVIII**, v. 20, p. 132–143, 1999.
- SANCHEZ, A.; MEDINA, N.; VOJINOVIC, Z.; PRICE, R. An integrated cellular automata evolutionary-based approach for evaluating future scenarios and the expansion of urban drainage networks. **Journal of Hydroinformatics**, v. 16, n. 2, p. 319–340, 1 mar. 2014.
- SANTOS, R. M. A formação do Movimento dos Pequenos Agricultores - MPA: por soberania alimentar, contra a mercadorização do campo no Brasil. **Revista NERA**, v. 19, n. 31, p. 10–31, 2016.
- SCHULZE, K.; KNIGHTS, K.; COAD, L.; GELDMANN, J.; LEVERINGTON, F.; EASSOM, A.; MARR, M.; BUTCHART, S. H. M.; HOCKINGS, M.; BURGESS, N. D. An assessment of threats to terrestrial protected areas. **Conservation Letters**, v. 11, n. 3, p. e12435, maio 2018.
- SHORT, N. M. **Mission to Earth: Landsat views the world**. Scientific and Technical Office, National Aeronautics and Space Administration, 1976.
- SHU, B.; ZHU, S.; QU, Y.; ZHANG, H.; LI, X.; CARSJENS, G. J. Modelling multi-regional urban growth with multilevel logistic cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 80, p. 101457, mar. 2020.
- SILVA, A. M. C.; CUNHA, M. C. C.; LOPES, D. V. Qualidade da água como reflexo de atividades antrópicas em bacias hidrográficas do Nordeste, Brasil. **Geosul**, v. 34, n. 72, p. 102–123, 25 jul. 2019.
- SILVA, F. E. L. DA; BEZERRA, J. A. Região e território: um breve olhar sobre a nova delimitação do Semiárido Brasileiro. **Homem, Espaço e Tempo**, v. 2, n. 14, p. 65–82, 2020.
- SILVA, J. B.; GUERRA, L. D.; IORIS, A. A.; GOMES, R. A. Conflitos sociopolíticos, recursos hídricos e programa um milhão de cisternas na região semiárida da Paraíba. **Novos**

Cadernos NAEA, v. 18, n. 2, 28 dez. 2015.

- SILVA, P. C. G. DA; MOURA, M. S. B. DE; KIILL, L. H. P.; BRITO, L. T. DE L.; PEREIRA, L. A.; SA, I. B.; CORREIA, R. C.; TEIXEIRA, A. H. DE C.; CUNHA, T. J. F.; GUIMARÃES FILHO, C. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010b. p. 18–48.
- SILVA, P. H. P. DA; RIBEIRO, M. M. R.; MIRANDA, L. I. B. DE. Uso de cadeia causal na análise institucional da gestão de recursos hídricos em reservatório no semiárido da Paraíba. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 637–646, 6 jul. 2017.
- SILVA, V. M. D. A.; PATRÍCIO, M. D. C. M.; RIBEIRO, V. H. D. A.; MEDEIROS, R. M. DE. O desastre seca no semiárido brasileiro. **Polemica**, v. 12, n. 2, p. 284–293, 2013.
- SOARES, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, p. 217–235, 2002.
- SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. Dinamica—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, n. 3, p. 217–235, set. 2002.
- SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L. M.; CERQUEIRA, G. C.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; VOLL, E.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, n. 7083, p. 520–523, mar. 2006.
- SOBRAL, M. DO C. M. ESTRATÉGIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 7, n. 2, 2011.
- SOUSA, J. J. DE B.; ARAÚJO, A. DE B.; DE LIMA, M. DE J. G. ANÁLISE DO NÍVEL DA ATIVIDADE AGROPECUARISTA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. In: PAVAN, L. S. (Ed.). **As Teorias Econômicas e a Economia Aplicada**. Ponta Grossa: Antonella Carvalho de Oliveira, 2018.
- SOUZA JUNIOR, C.; AZEVEDO, T. **MapBiomias General Handbook**. p. 1–23, 2017.
- SOUZA JUNIOR, C.; AZEVEDO, T. **MapBiomias General Handbook: Collection 4**. p. 1–40, 2019.
- SOUZA, C. M.; 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.; DE OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020.

- STÉPHENNE, N.; LAMBIN, E. F. A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU). **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 85, n. 1–3, p. 145–161, jun. 2001.
- SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Delimitação do semiárido. **Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste**. Disponível em: <<http://sudene.gov.br/>> Acesso em: 11 fev. 2021.
- SUN, H.; FORSYTHE, W.; WATERS, N. Modeling Urban Land Use Change and Urban Sprawl: Calgary, Alberta, Canada. **Networks and Spatial Economics**, v. 7, n. 4, p. 353–376, 17 out. 2007.
- SUNDE, M. G.; HE, H. S.; ZHOU, B.; HUBBART, J. A.; SPICCI, A. Imperviousness Change Analysis Tool (I-CAT) for simulating pixel-level urban growth. **Landscape and Urban Planning**, v. 124, p. 104–108, abr. 2014.
- SWEETAPPLE, C.; FU, G.; FARMANI, R.; BUTLER, D. Exploring wastewater system performance under future threats: Does enhancing resilience increase sustainability? **Water Research**, v. 149, p. 448–459, fev. 2019.
- TANG, Q.; OKI, T. **Terrestrial water cycle and climate change: Natural and human-induced impacts**. John Wiley & Sons, 2016.
- TEAM, R. C. ET AL. **R: A language and environment for statistical computing**.
- TSUYUGUCHI, B. B.; MORGAN, E. A.; RÊGO, J. C.; OLIVEIRA GALVÃO, C. DE. Governance of alluvial aquifers and community participation: a social-ecological systems analysis of the Brazilian semi-arid region. **Hydrogeology Journal**, 16 maio 2020.
- TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, v. 70, p. 24–35, 2006.
- VAN ABS, D. J. **Water Resources Baseline Topic Report**. 1. ed. New Brunswick: Together North Jersey, 2013.
- VAN VLIET, J.; HURKENS, J.; WHITE, R.; VAN DELDEN, H. An Activity-Based Cellular Automaton Model to Simulate Land-Use Dynamics. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 39, n. 2, p. 198–212, abr. 2012.
- VANNIER, C.; BIERRY, A.; LONGARETTI, P.-Y.; NETTIER, B.; CORDONNIER, T.; CHAUVIN, C.; BERTRAND, N.; QUÉTIER, F.; LASSEUR, R.; LAVOREL, S. Co-constructing future land-use scenarios for the Grenoble region, France. **Landscape and Urban Planning**, v. 190, p. 103614, out. 2019.
- VERBURG, P. H.; OVERMARS, K. P. Dynamic Simulation of Land-Use Change Trajectories with the Clue-S Model. In: KOOMEN, E. et al. (Eds.). **Modelling Land-Use Change: Progress and Applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. p. 321–337.
- VERONES, F.; PFISTER, S.; VAN ZELM, R.; HELLWEG, S. Biodiversity impacts from

- water consumption on a global scale for use in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 8, p. 1247–1256, 1 ago. 2017.
- VIDAL, M. M.; BANKS-LEITE, C.; TAMBOSI, L. R.; HASUI, É.; DEVELEY, P. F.; SILVA, W. R.; GUIMARÃES, P. R.; METZGER, J. P. Predicting the non-linear collapse of plant–frugivore networks due to habitat loss. **Ecography**, v. 42, n. 10, p. 1765–1776, 23 out. 2019.
- VIEIRA, V. P. P. B. Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no semi-árido. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 7–17, 2003.
- VIEIRA, V. P. P. B. Sustentabilidade do semiárido brasileiro: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 105–112, 2002.
- VILJOEN, F. C. The World Health Organization’s water safety plan is much more than just an integrated drinking water quality management plan. **Water Science and Technology**, v. 61, n. 1, p. 173–179, jan. 2010.
- VON NEUMANN, J.; BURKS, A. W. Theory of self-reproducing automata. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 5, n. 1, p. 3–14, 1966.
- VÖRÖSMARTY, C. J.; MCINTYRE, P. B.; GESSNER, M. O.; DUDGEON, D.; PRUSEVICH, A.; GREEN, P.; GLIDDEN, S.; BUNN, S. E.; SULLIVAN, C. A.; LIERMANN, C. R.; DAVIES, P. M. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, n. 7315, p. 555–561, 29 set. 2010.
- WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns. **Environment and Planning A: Economy and Space**, v. 25, n. 8, p. 1175–1199, 29 ago. 1993.
- WILLIAMS, D. L.; GOWARD, S.; ARVIDSON, T. Landsat: Yesterday, Today, and Tomorrow. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 10, p. 1171–1178, 1 out. 2006.
- WISNER, B.; BLAIKIE, P. M.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At risk: natural hazards, people’s vulnerability and disasters**. Londres: Psychology Press, 2004.
- WOODCOCK, C. E.; ALLEN, R.; ANDERSON, M.; BELWARD, A.; BINDSCHADLER, R.; COHEN, W.; GAO, F.; GOWARD, S. N.; HELDER, D.; HELMER, E.; et al. Free Access to Landsat Imagery. **Science**, v. 320, n. 5879, p. 1011a-1011a, 23 maio 2008.
- WU, J. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. **Landscape and Urban Planning**, v. 125, p. 209–221, maio 2014.
- WULDER, M. A.; COOPS, N. C. Satellites: Make Earth observations open access. **Nature**, v. 513, n. 7516, p. 30–31, 2 set. 2014.
- WULDER, M. A.; MASEK, J. G.; COHEN, W. B.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 2–10, jul. 2012.

- XIONG, J.; THENKABAIL, P. S.; GUMMA, M. K.; TELUGUNTLA, P.; POEHNELT, J.; CONGALTON, R. G.; YADAV, K.; THAU, D. Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 126, p. 225–244, abr. 2017.
- XU, Z.; WAN, S.; ZHU, G.; REN, H.; HAN, X. The Influence of Historical Land Use and Water Availability on Grassland Restoration. **Restoration Ecology**, v. 18, p. 217–225, set. 2010.
- YANG, J.; GONG, J.; TANG, W.; LIU, C. Patch-based cellular automata model of urban growth simulation: Integrating feedback between quantitative composition and spatial configuration. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 79, p. 101402, jan. 2020.
- ZENG, X.; ZENG, X.; SHEN, S. S. P.; DICKINGSON, R. E.; ZENG, Q.-C. Vegetation—soil water interaction within a dynamical ecosystem model of grassland in semi-arid areas. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 57, n. 3, p. 189–202, 18 jan. 2005.
- ZHANG, B.; CHEN, Z. M.; ZENG, L.; QIAO, H.; CHEN, B. Demand-driven water withdrawals by Chinese industry: a multi-regional input-output analysis. **Frontiers of Earth Science**, v. 10, n. 1, p. 13–28, 9 mar. 2016.
- ZHANG, J. Y.; WANG, Y.; ZHAO, X.; XIE, G.; ZHANG, T. Grassland recovery by protection from grazing in a semi-arid sandy region of northern China. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 48, n. 2, p. 277–284, 17 jan. 2005.
- ZHU, Z.; WULDER, M. A.; ROY, D. P.; WOODCOCK, C. E.; HANSEN, M. C.; RADELOFF, V. C.; HEALEY, S. P.; SCHAAF, C.; HOSTERT, P.; STROBL, P.; PEKEL, J.-F.; LYMBURNER, L.; PAHLEVAN, N.; SCAMBOS, T. A. Benefits of the free and open Landsat data policy. **Remote Sensing of Environment**, v. 224, p. 382–385, abr. 2019.