



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE

LALDIANE DE SOUZA PINHEIRO

PROPOSTA DE MODELO DE APOIO À DECISÃO APLICADO À CONSERVAÇÃO
DE BACIAS HIDROGRÁFICAS NO NORDESTE BRASILEIRO

FORTALEZA

2023

LALDIANE DE SOUZA PINHEIRO

PROPOSTA DE MODELO DE APOIO À DECISÃO APLICADO À CONSERVAÇÃO DE
BACIAS HIDROGRÁFICAS NO NORDESTE BRASILEIRO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Jeovah de Andrade Meireles

Coorientador: Prof. Dr. Sergio Rossi

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P72p

Pinheiro, Laldiane de Souza.

Proposta de Modelo de Apoio à Decisão Aplicado à Conservação de Bacias Hidrográficas no Nordeste Brasileiro / Laldiane de Souza Pinheiro. – 2023.
108 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Antonio Jeovah de Andrade Meireles.

Coorientação: Prof. Dr. Sergio Rossi.

1. Bacias Hidrográficas. 2. Priorização de Áreas. 3. Método AHP. 4. Autocorrelação Espacial. 5. Áreas de Preservação Permanentes. I. Título.

CDD 333.7

LALDIANE DE SOUZA PINHEIRO

PROPOSTA DE MODELO DE APOIO À DECISÃO APLICADO À CONSERVAÇÃO DE
BACIAS HIDROGRÁFICAS NO NORDESTE BRASILEIRO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 25 / 08 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Jeovah de Andrade Meireles (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sergio Rossi (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Edson Vicente da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Christine Farias Coelho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Patrícia Verônica Pinheiro Sales Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Renan Gonçalves Pinheiro Guerra
Programa Cientista Chefe do Meio Ambiente (SEMA)

À minha mãe Lourdes, ao meu pai Francisco (*in memoriam*), à minha vó Telina (*in memoriam*), e à minha madrinha Socorro, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à Nossa Senhora de Fatima, por ter me sustentado em todos os momentos.

Agradeço à minha mãe, Lourdes, pelo amor incondicional, encorajamento e por ter se sacrificado muitas vezes para que eu finalizasse essa tese.

À minha família, Lidriana, Leyliane, Aderson, Namor, Diane, Gabriel, Alex, Sergio e madrinha Socorro, gostaria de agradecer por estarem ao meu lado, me incentivando e motivando, não apenas nesta etapa do doutorado, mas em todos os aspectos da minha vida. Amo vocês!

Com todo meu amor e gratidão, agradeço em especial minha irmã Lidriana, que além de ser inspiração acadêmica, é exemplo de generosidade, e que me deu forças para superar os obstáculos que surgiram ao longo dessa jornada.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Prof. Jeovah Meireles, pela confiança, orientação e apoio ao longo de toda essa jornada. Ao meu coorientador, Prof Sergio Rossi, sou profundamente grata por sua orientação, encorajamento e contribuições valiosas para esta tese.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, por todo apoio recebido da coordenação e dos técnicos administrativos, em especial, à Sônia, que sempre me recebeu com sorrisos e me auxiliou na resolução de problemas. `

Aos meus amigos queridos, Chris, Gleiber, Adriana, Ruth, Tatiana, Airton e Edno, que sempre se fizeram presentes no apoio, compreensão e nos momentos de alegria. E ao meu amigo Aquiles, da minha pequena turma de doutorado, por compartilharmos juntos dos momentos de alegria e angústia do doutorado.

Gostaria de agradecer também aos membros da banca examinadora, Profa Dra. Patrícia Verônica, Profa. Dra. Christine Farias, Prof. Dr. Renam Guerra, e Prof. Dr. Edson Vicente (Cacau), por dedicarem seu tempo e expertise para avaliar este trabalho. Suas contribuições valiosas e sugestões construtivas são essenciais para aprimorar a qualidade desta tese.

RESUMO

As mudanças no uso e cobertura da terra, como o desmatamento, ao longo de toda a bacia hidrográfica promovem uma série de impactos nos serviços ambientais. A verificação do cumprimento da legislação em relação a conservação das florestas, a caracterização da evolução dessas mudanças ao longo do tempo, e a existência de modelos que priorizem áreas para planos de ação de proteção, são importantes para a gestão dos recursos hídricos. Nessa perspectiva, este estudo teve como objetivo propor modelo de apoio a gestão dos recursos hídricos para ações de manejo e conservação da oferta e qualidade hídrica em bacias hidrográficas, utilizando análise multicritério, e tendo como área de estudo três microbacias pertencentes a unidades geoambientais distintas, serra, sertão e litoral, na Bacia do Rio Choró-Ce. Ao analisar a evolução dos usos e cobertura da terra de 2012 a 2022, foi identificado que em todas as microbacias houve uma diminuição das áreas de florestas e um aumento das áreas antropizadas. As áreas de preservação permanente apresentaram percentual de conflito nos seus usos de 31%, 12% e 20% para as bacias da serra, sertão e litoral, respectivamente. As áreas estratégicas e prioritárias para conservação nas bacias hidrográficas, foram mapeadas com o modelo multicritério proposto, utilizando o método AHP para ponderação dos seus critérios, e que após consulta aos especialistas foram definidos os pesos para os critérios: uso e cobertura da terra (0,43), proximidade das nascentes (0,23), proximidade da drenagem (0,13), proximidade com as fontes de recarga dos aquíferos (0,12) e declividade (0,09), o que permitiu identificar as áreas com prioridades muito alta, alta, média e baixa. As áreas com prioridade muito alta estão situadas nas regiões produtoras de água. O Índice de Moran Global para as bacias (0,413, 0,592 e 0,601), indicou que existe autocorrelação espacial e que as áreas prioritárias para conservação tendem a se agrupar espacialmente, sinalizando informações importantes para a tomada de decisão. O mau manejo florestal nas microbacias vem aumentando os impactos ambientais e a diminuição dos serviços ambientais prestados por elas, a exemplo do aumento da temperatura local de superfície e das emissões de carbono para atmosfera. As análises aqui apresentadas reforçam a necessidade urgente de ferramentas que auxiliem na gestão eficiente, promovendo ações recuperação e conservação das bacias hidrográficas.

Palavras-Chave: bacias hidrográficas; priorização de áreas; método AHP; autocorrelação espacial; áreas de preservação permanentes.

ABSTRACT

Changes in land use and land cover, such as deforestation, throughout the entire watershed promote a series of impacts on environmental services. Checking compliance with legislation regarding forest conservation, characterizing the evolution of these changes over time, and having models that prioritize areas for protection action plans, are important for water resource management. From this perspective, this study aimed to propose a water resource management support model for management and conservation actions related to water supply and quality in watersheds, using multicriteria analysis. The study area included three microbasins belonging to distinct geo-environmental units: mountain, hinterland, and coast areas in the Choró-Ce River Basin. Analyzing the evolution of land use and cover from 2012 to 2022, it was identified that there was a decrease in forest areas and an increase in anthropized areas in all microbasins. Permanent preservation areas showed a percentage of conflict in their uses of 31%, 12% and 20% for the mountain, hinterland and coast basins, respectively. Strategic and priority conservation areas in the watershed were mapped with the proposed multicriteria model, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to weigh the criteria. After consultation with experts, the criteria weights were defined as follows: land use and land cover (0.43), proximity to springs (0.23), proximity to drainage (0.13), proximity to aquifer recharge sources (0.12) and slope (0.09). This allowed for the identification of areas with very high, high, medium, and low priorities. Areas with very high priority are located in water producing regions. The Global Moran's Index for the basins (0.413, 0.592 and 0.601) indicated spatial autocorrelation and that priority areas for conservation tend to cluster spatially, providing important information for decision making. Poor forest management in the microbasins is increasing environmental impacts and decreasing the environmental services they provide, such as the increase in local surface temperature and carbon emissions into the atmosphere. The analyzes presented emphasize the urgent need for tools that assist in efficient management, promoting recovery and conservation actions for watersheds.

Keywords: watersheds; area prioritization; AHP method; spatial autocorrelation; permanent preservation areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização das Áreas de Estudo	18
Figura 2 –	Modelo digital de elevação das Microbacias de estudo usando imagens NASADEM. a) B1: Bacia Serra; b) B3: Bacia Litoral; c) B2: Bacia Sertão Microbacias de estudo. a) B1: Bacia Serra; b) B3: Bacia Litoral; c) B2: Bacia Sertão.	19
Figura 3 –	Estrutura básica da hierarquia	27
Figura 4 –	Etapas metodológicas da análise do uso e cobertura da terra	31
Figura 5 –	Uso e Ocupação da Terra nos anos de 2013 e 2022	35
Figura 6 –	Espacialização da mudança de cobertura da terra entre os anos de 2013 e 2022. B1-Bacia Serra; B2-Bacia Sertão e B3-Bacia Litoral	38
Figura 7 –	Conflitos de uso da terra nas áreas de preservação permanente nas microbacias. B1-Bacia Serra; B2-Bacia Sertão e B3-Bacia Litoral	40
Figura 8 –	Quantificação dos conflitos de usos nas Áreas de Preservação Permanente nas microbacias B1, B2 e B3	41
Figura 9 –	Fluxograma Metodológico do Modelo de Apoio a Decisão	47
Figura 10 –	Critérios Bacia Serra - B1	51
Figura 11 –	Critérios Bacia Sertão - B2	52
Figura 12 –	Critérios Bacia Litoral - B3	53
Figura 13 –	Notas dos Subcritérios da B1	59
Figura 14 –	Notas dos Subcritérios da B2	60
Figura 15 –	Notas dos Subcritérios da B3	61
Figura 16 –	Áreas Prioritárias à Conservação na B1	64
Figura 17 –	Áreas Prioritárias à Conservação na B2	65
Figura 18 –	Áreas Prioritárias à Conservação na B3	66
Figura 19 –	Autocorrelação espacial do indicador Local de Moran (LISA) para as áreas prioritárias à conservação na B1, B2 e B3	68
Figura 20 –	Mapas de Temperatura (TST) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da superfície terrestre na B1 e B2 nos anos de 2013 e 2022	75
Figura 21 –	Perfil mostrando a variabilidade de TST e NDVI nas bacias B1 e B2 no ano de 2022	76

Figura 22 – Localização da Área de Estudo	79
Figura 23 – Mudanças na cobertura de mangue com base nas imagens do Mapbiomas na foz do Rio Choró (1985-2021)	83
Figura 24 – Comparação entre perdas e ganhos de áreas do manguezal do Rio Choró	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalos de aceitação dos resultados dos índices Kappa	32
Tabela 2 – Acurácia dos mapas de uso e ocupação da terra nas três Microbacias nos anos de 2013 e 2022. B1: Bacia Serra; B2: Bacia Sertão; B3: Bacia Litoral	33
Tabela 3 – Quantificação das categorias de uso da terra entre 2013 e 2022	36
Tabela 4 – Valores de Índices Randômicos	55
Tabela 5 – A natureza e hierarquia do modelo APC-AHP	57
Tabela 6 – Matriz Pareada com agrupamento dos julgamentos dos decisores para o modelo ACP-AHP	62
Tabela 7 – Tabela com Kendall's Tau, estimador de Sen's e significância estatística (1985-2021)	66
Tabela 8 – Estimativas de estoque de C e emissão de CO ₂ no manguezal do Rio Choró (1985-2021)	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Escala numérica de Saaty	28
Quadro 2 – Síntese da base de dados utilizadas no presente estudo	30
Quadro 3 – Ferramentas utilizadas para extração de dados e relação funcional de cada critério com as áreas prioritárias à conservação	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	15
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	15
1.2	Área de estudo	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Degradação Hídrica e Fatores de Vulnerabilidade Ambiental	20
2.2	Potencialidades da Ciência de dados na Conservação dos Recursos Hídricos	23
2.3	Metodologia Multicritério de Apoio a Decisão	24
3	MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DA TERRA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO NORDESTE BRASILEIRO	29
3.1	Introdução	29
3.2	Material e Métodos	30
3.3	Resultados e Discussão	33
<i>3.3.1</i>	<i>Análise do Uso e Cobertura da Terra nas Microbacias</i>	33
<i>3.3.2</i>	<i>Evolução do conflito de uso nas Áreas de Preservação Permanente</i>	38
3.4	Conclusões	42
4	MODELO DE PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS PARA CONSERVAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS: ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA APOIO À DECISÃO	44
4.1	Introdução	44
4.2	Material e Métodos	47
<i>4.2.1</i>	<i>Definição dos Critérios e Subcritérios</i>	48
<i>4.2.2</i>	<i>Determinação do Peso dos Critérios</i>	54
<i>4.2.3</i>	<i>Avaliação das Áreas Prioritárias</i>	55
<i>4.2.4</i>	<i>Autocorrelação Espacial</i>	55
4.3	Resultados e Discussão	56
<i>4.3.1</i>	<i>Influência dos Subcritérios no Modelo APC-AHP</i>	57
<i>4.3.2</i>	<i>Pesos dos Critérios do Modelo APC- AHP</i>	62
<i>4.3.3</i>	<i>Áreas Prioritárias à Conservação nas Bacias Hidrográficas</i>	63
<i>4.3.4</i>	<i>Análise de Autocorrelação Espacial</i>	67

4.4	Conclusões	68
5	CONSERVAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS E SUAS IMPLICAÇÕES NOS SERVIÇOS AMBIENTAIS	70
5.1	Introdução	70
5.2	Estudo de caso 1: Análise comparativa das mudanças de uso e cobertura da terra e sua relação com temperatura de superfície das bacias hidrográficas	71
5.2.1	<i>Introdução</i>	71
5.2.2	<i>Material e Métodos</i>	71
5.2.3	<i>Resultados e Discussão</i>	73
5.2.4	<i>Conclusões</i>	77
5.3	Estudo 2: Dinâmica da cobertura de Manguezais no Estuário do Rio Choró - CE e sua relação com o sequestro de carbono	77
5.3.1	<i>Introdução</i>	77
5.3.2	<i>Material e Métodos</i>	79
5.3.3	<i>Resultados e Discussão</i>	81
5.3.4	<i>Conclusões</i>	86
6	CONCLUSÕES	88
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – FORMULÁRIO APLICADO AOS ESPECIALISTAS	107

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é a unidade territorial adotada para fins de planejamento da gestão hídrica do Brasil, fundamentada pelo Art. 1º, inciso V, da Lei n.º 9.433, referente a Política Nacional dos Recursos Hídricos (Brasil, 1997). Ao longo de sua extensão pode apresentar distintos tipos de conflitos e impactos, derivados da produção social além dos seus divisores de água (Carvalho, 2020). Entender esses processos é urgente, em um cenário de escassez hídrica pelo crescimento na duração das secas no Nordeste brasileiro pelas mudanças climáticas (Masson-Delmotte; Zhai; Pirani, 2021). Numa época em que a água e tudo o que dela provém estão sob grande pressão devido às atividades agrícola, industrial ou urbana, fornecer soluções precisas baseadas em modelos multivariados pode ser a chave para a utilização de um patrimônio tão precioso. Diante desse cenário, a busca por áreas com disponibilidade hídrica, temperatura mais amena e solos produtivos será cada vez maior. Essa demanda gera uma preocupação em escala mundial, entre os que buscam um desenvolvimento sustentável.

Dentre os objetivos para o desenvolvimento sustentável, destaca-se o objetivo 6 que visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todas as pessoas (IPEA, 2019), tendo como metas o enfrentamento da escassez de água e redução substancial do número de pessoas que sofrem com a escassez de água, garantindo assim a segurança hídrica (Abreu; Mesquita; Bermudez, 2021).

Muitos conflitos hoje, em todo o mundo, se devem à água e seu controle, ao uso de bacias hidrográficas que são a base essencial para o funcionamento da vida (Gari *et al.*, 2020). As mudanças no uso da terra estão alterando rapidamente a dinâmica do ambiente, gerando uma série de incertezas em relação à sustentabilidade e resiliência (Thakur *et al.*, 2021; Galata, 2020). No Brasil esse problema existe, principalmente na zona semiárida do nordeste do país. A análise histórica das mudanças do uso e cobertura da terra geram informações importantes para a tomada de decisões e utilização adequada dos recursos naturais (Chowdhury; Hafsa, 2022; Mallupattu; Reddy, 2013; Negassa; Mallie; Gameda, 2020; Zebende; Weckmüller; Vicens, 2019), pois permite identificar e monitorar as variáveis que controlam os processos naturais, culturais e socioeconômicos que as induzem (Badia *et al.*, 2019).

Sem longas séries temporais fica difícil acompanhar o caminho dos problemas, dos impactos que devem ser considerados para entender por que chegamos a um ponto ou outro na

gestão de bacias hidrográficas. Nas bacias hidrográficas essas mudanças a longo prazo podem interferir principalmente no abastecimento hídrico, segurança alimentar e saúde.

A compreensão dos impactos nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e o olhar para a conservação dos recursos hídricos é urgente em virtude da pressão para expansão de áreas urbanas, industriais e agricultáveis. Confirmando a necessidade do ordenamento territorial a ser implantado em bases sustentáveis. O aumento da ocupação de áreas periféricas e próximas às nascentes ao longo de toda a bacia hidrográfica está promovendo uma série de impactos nos recursos hídricos (Correia; Oliveira; Araújo, 2020). Por exemplo, a retenção de água depende da saúde e do tipo de ecossistema. Um ecossistema saudável pode reter muito mais água graças a ter os elementos certos para controlar o escoamento de água. O desmatamento aumenta a erosão de solos e, conseqüentemente, traz prejuízos aos corpos hídricos com o aumento da turbidez e perda do volume útil (Chaves *et al.*, 2019). Como também, existe a necessidade de ofertar mais água, conseqüentemente aumenta a pressão sobre esses recursos.

No litoral, a ampliação de sistemas produtivos como a carcinicultura pressiona ambientes de relevante interesse ecológico, a exemplo dos manguezais (Queiroz *et al.*, 2013). A expansão urbana nas regiões litorâneas reflete em problemas de abastecimento hídrico pelo esgotamento da capacidade de suporte e qualidade dos aquíferos costeiros, a exemplo das dunas e aluviões. Diante de um cenário de emergência climática é cada vez mais necessário a elaboração de instrumentos legais e metodologias de monitoramento e de tomadas de decisão, considerando os aspectos ambientais, sociais, culturais e econômicos de uma dada região.

Uma unidade de planejamento, como a bacia hidrográfica, que agrupa diversos ecossistemas, pode apresentar níveis diferenciados de vulnerabilidades, fragilidades e resiliências. Nesse contexto, as análises espaciais de séries históricas e a identificação de variáveis relevantes e passíveis de acompanhamento são fundamentais para o alcance das metas estabelecidas para a disponibilidade e conservação dos recursos hídricos, um dos grandes desafios nesse século.

A disponibilidade de base de dados, softwares de acesso livre, aprimoramento das técnicas de interpretação e processamento digital potencializam a sua utilização como uma ferramenta eficaz para a tomada de decisão e investimentos nas ações de conservação da bacia hidrográfica (Almeida; Ferreira Júnior; Bayer., 2018; Gameiro *et al.*, 2022). A metodologia de multicritério de apoio à decisão torna-se uma ferramenta de grande potencial estratégico ao

planejamento da gestão pública dos recursos hídricos, visto que consiste em uma forma de descobrir soluções possíveis e conciliáveis com os interesses do decisor. Essas técnicas utilizam o paradigma científico construtivista, considerando diversos pontos de vista e examinando as ações referentes a um conjunto de dados (Ensslin *et al.*, 2012).

A proposta de aplicação de um modelo que priorize as áreas para investimentos na conservação dos recursos hídricos vai de encontro às premissas da Ciência de dados (big data), que se constitui uma ferramenta importante de apoio a tomada de decisão, principalmente em áreas com menor disponibilidade de recursos, como o Semiárido Nordeste. O estabelecimento de índices/indicadores ou padrões básicos de informação/medição, devidamente articulados com objetivos claros de monitoramento (e do uso final da informação coletada/sistematizada), constitui a espinha dorsal de qualquer sistema de monitoramento (Vieira; Studart, 2009).

Os serviços ambientais surgem como mecanismos que podem estimular a diminuição das pressões e favorecer os processos de recuperação de áreas degradadas e conservação nas bacias hidrográficas. Em face do exposto à hipótese que norteia este trabalho é: uso de metodologia específica (análise multicritério) utilizada para diversas áreas contribui com informações relevantes na melhoria da Gestão dos Recursos Hídricos.

Os resultados da tese estão estruturados em três capítulos de resultados, nos quais as metodologias serão descritas de forma detalhada em cada um deles.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor modelo de apoio a gestão dos recursos hídricos para ações de manejo e conservação da oferta e qualidade hídrica em bacias hidrográficas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar a evolução dos usos e cobertura da terra, associando a distribuição dos sistemas ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Choró, e suas respostas na pressão nos recursos hídricos;

- Propor modelo para mapeamento de áreas estratégicas e prioritárias para conservação como subsídio a gestão de bacias hidrográficas do semiárido;
- Identificar os Serviços Ambientais atrelados a conservação nas bacias hidrográficas e suas implicações no monitoramento e gestão.

1.2 Área de estudo

As áreas de estudo são três microbacias que perfazem contextos distintos da Bacia Hidrográfica do Rio Choró (BHRC) (Figura 1). A BHRC está localizada na Bacia Metropolitana do Estado do Ceará, com área de drenagem de 4.717,1 km² e perímetro de 484 km. Possui poucos afluentes significativos em sua margem direita, já na margem esquerda pode-se encontrar os importantes afluentes dos riachos Aracoiaba, Cangati e Castro (Ceará, 2016). O comprimento do talvegue é de 200,00 km, com declividade média do rio principal de 1,42 m/km e declividade média da bacia de 11,00% (Ceará, 2016). A vazão na estação de Águas Belas varia de 0,6 a 6,28 m³/s ao longo do ano (ANA, 2016).

A BHRC está inserida em quatro unidades geomorfológicas: Tabuleiros Litorâneos Cearenses, Serra de Baturité, Planícies e Terraços Fluviais e Depressão Sertaneja Setentrional (CEARÁ, 2016). A geologia é caracterizada pelas rochas do Complexo Canindé do Ceará, Grupo Barreiras e os Depósitos litorâneos, com as formações superficiais dos aluviões, mangues, dunas e praias (CPRM, 2004). A Floresta Ombrófila Aberta Submontana é encontrada na região da Serra de Baturité e nos seus arredores, Savana-Estépica arborizada e savana estépica na depressão sertaneja, Savana-Estépica parque nos terraços fluviais, Contato Savana-Estépica/Formações Pioneiras e vegetação antropizada nos tabuleiros e manguezais e Formação Pioneira com influência marinha herbácea na planície litorânea (IBGE, 2021).

A população no ano de 2010 era de 274.558 habitantes e 73.859 domicílios (IBGE, 2010). O abastecimento hídrico dos 21 municípios que integram a BHRC é feito pela rede de abastecimento público de água nas áreas urbanas, poços tubulares e açudes (Ceará, 2016). O percentual de cobertura de esgotamento sanitário na BH considerando as áreas urbanas e rurais é de aproximadamente 20% (IBGE, 2010). No estado do Ceará o atendimento da rede de esgoto cobre em média de 30% da população (Brasil, 2021).

As características socioeconômicas na BHRC são bastante diversificadas, com grandes variações na distribuição da contribuição dos setores primários, secundários e terciários na formação do Produto Interno Bruto (PIB) (IBGE, 2004). Em 2012 o PIB total dos municípios

contidos nas bacias apresentava a seguinte distribuição. setor agropecuário: 11,37% ($\sigma^2= 8,59$); setor industrial: 17,13% ($\sigma^2= 9,85$) e setor de serviços: 71,50% ($\sigma^2= 10,36$) (Ceará, 2019). Em 2012, o IDHM dos municípios encontrava-se na faixa variando entre médio e baixo.

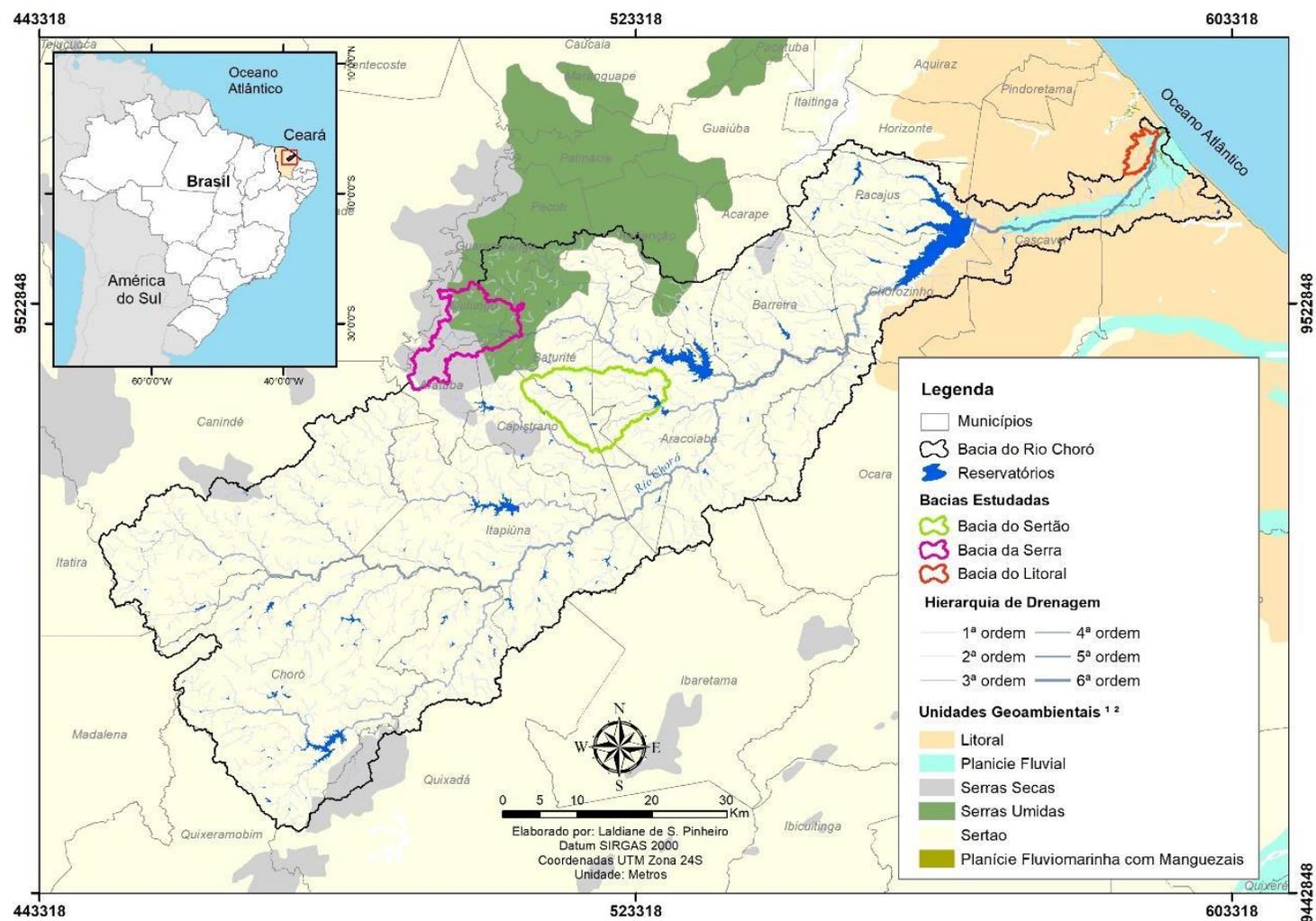
Os critérios de escolha das três microbacias analisadas consideraram as unidades geoambientais distintas, permitindo avaliar as diferentes características na análise das tendências da evolução do uso da terra, drenagem, ocupação urbana e aplicação de critérios nos modelos de tomada de decisão. Para isto foi utilizada a base de Compartimentação Geoambiental do Estado do Ceará (Ceará, 2019), na escala de 1:600.000. Outros critérios utilizados foram a confluência para um ambiente aquático (reservatórios e estuários), ocupação predominantemente rural e a presença de zonas urbanas.

As microbacias foram denominadas neste estudo como B1, B2 e B3 (Figura 2). A Bacia da Serra (B1), possui uma área de 99,05 km², situada entre os municípios de Mulungu, Aratuba e Capistrano, com elevação variando de 217 a 1038 m (Figura 2). Conforme a compartimentação Geoambiental do Estado do Ceará, a B1 tem sua maior porção de área na unidade de Serras Úmidas, e o restante em Serras Secas (Ceará, 2019). O clima é tropical subquente e quente úmido (Funceme, 2019). A microbacia pertence a um importante ambiente de exceção em meio ao bioma caatinga, constituída por unidade fitoecológica do tipo Mata Úmida (Funceme, 2018). A bacia possui 72% do seu território inserida na APA de Baturité, instituída pelo Decreto nº 20.956 de 19/09/90 (Ceará, 1990).

A Bacia do Sertão (B2), alcança os municípios de Baturité, Capistrano e Aracoiaba, com 141,22 km² de área, pertencente à unidade geoambiental dos Sertões (Ceará, 2019), com clima tropical quente semiárido (Funceme, 2019). com chuvas muito irregulares e rios com intermitência sazonal (ARAÚJO et al., 2021). As cotas de altitude variam de 80 a 600m (Figura 2), e possui a caatinga como sua unidade fitoecológica (Funceme, 2018).

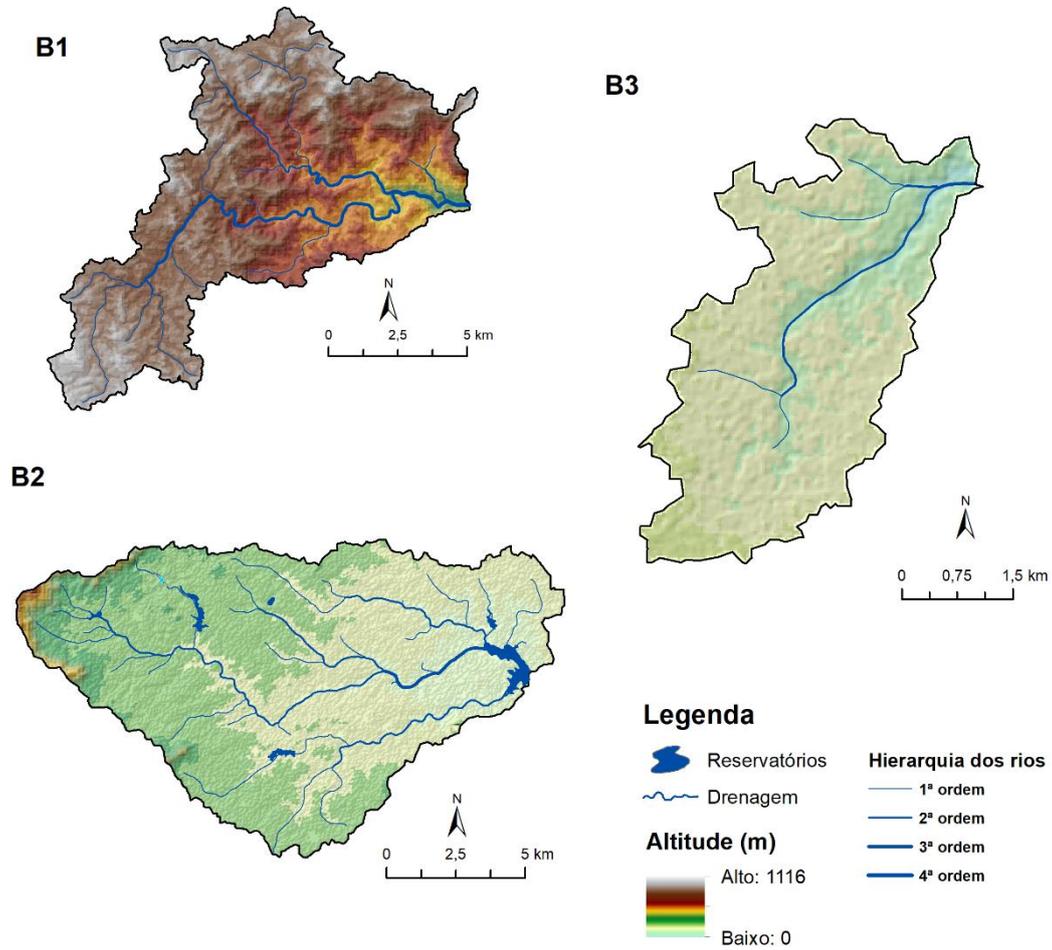
A Bacia do Litoral (B3), situada nas unidades geoambientais litoral e planície fluvial (Ceará, 2019), possui área de 15,04 km² e está situada entre as cotas de 0 a 43 m (Figura 2). O clima é do tipo Tropical Quente Semiárido Brando (Funceme, 2019).

Figura 1 - Localização das Áreas de Estudo



Fonte: Autora.

Figura 2 – Modelo digital de elevação das Microbacias de estudo usando imagens NASADEM.
 a) B1: Bacia Serra; b) B3: Bacia Litoral; c) B2: Bacia Sertão. Microbacias de estudo. a) B1:
 Bacia Serra; b) B3: Bacia Litoral; c) B2: Bacia Sertão.



Fonte: Autora.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Degradação Hídrica e Fatores de Vulnerabilidade Ambiental

A água configura-se como um dos recursos naturais mais preciosos, tornando-a um bem econômico. A irregularidade espacial da disponibilidade hídrica, em função das condições geográficas, climáticas e meteorológicas, tem desde sempre conduzido a um cenário onde a escassez hídrica inviabiliza ou restringe a qualidade de vida de uma dada comunidade e/ou contribui para o surgimento e agravamento de conflitos.

A limitação do uso da água que se encontra na natureza para atender as necessidades humanas apresenta duas dimensões do problema: o quantitativo e o qualitativo (Grey; Sadoff, 2007). O problema quantitativo se refere à existência de fontes hídricas que assegurem a quantidade de água necessária e com o nível de garantia desejável para cada tipo de uso, enquanto a variável qualitativa está relacionada à qualidade da água adequada aos mesmos tipos de uso. Ambos os problemas assumem uma magnitude maior ou menor dependendo do custo para sua disponibilização na quantidade e qualidade para os fins que se destinam.

A segurança hídrica está relacionada com a escassez da água para diferentes usos, a qualidade da água e aos excessos das inundações, estando relacionada com a gestão do risco pela falta do recurso ou o seu excesso (Tucci; Chagas, 2017). Os conceitos de escassez de água e os impactos de qualidade da água, associado com as relações entre o avanço tecnológico e o crescimento demográfico, foram definidos por (Falkenmark; Lundqvist, 1998).

Grey e Sadoff (2007, p. 35) definem Segurança Hídrica como:

Disponibilidade de água em quantidades e qualidades aceitáveis para a saúde, meios de subsistência, ecossistemas e produção, e níveis aceitáveis de riscos relacionados à água para as pessoas, o meio ambiente e a economia.

Como uma forma de estabelecer estratégias para o convívio com a situação de escassez hídrica no Estado do Ceará, visto que 92% do seu território está inserido no semiárido, caracterizado por um regime de chuva irregular com períodos extensos de estiagem, intermitência dos rios, elevadas taxas evaporação potencial e solos rasos (De Araújo; Güntner; Bronstert, 2006), várias ações e estudos foram e estão sendo executadas para que a disponibilidade de água seja realidade para a população do Estado do Ceará.

A bacia hidrográfica é uma porção de terra delineada topograficamente, drenada por um canal principal e seus afluentes, sendo uma unidade de resposta hidrológica (Chang; Su; Katayama, 2021). O planejamento integrado de bacias hidrográficas auxilia no gerenciamento da unidade territorial e sua implementação depende de um conjunto de fatores interdisciplinares que objetiva uma avaliação sistêmica da dinâmica ambiental e territorial da área em análise (Soares *et al.*, 2017).

Nos maciços elevados cearenses, a exemplo das serras cristalinas de Baturité, Maranguape, Aratanha, Uruburetama e Meruoca, ocorrem a presença de mata úmida, sendo possível encontrar resquícios da Mata Atlântica (Freire; Souza, 2006; Soares *et al.*, 2021), e têm uma importância fundamental por comporem um sistema de dispersão de drenagem e fontes de água natural, distribuídas por meio do sistema de bacias, de onde vêm sendo observados cada vez mais problemas de disponibilidade hídrica e qualidade da água.

Vários fatores contribuem para a alteração na disponibilidade e qualidade da água dos mananciais, podendo ser de causas naturais e/ou antrópicas. A primeira decorre das condições do ciclo hidrológico, como os escoamentos superficiais, que transportam sedimentos, detritos (materiais sólidos) e sais dissolvidos. A segunda, em decorrência de várias atividades desenvolvidas na bacia hidrográfica sem o devido controle, destacando-se: a ocupação desordenada do território; ausência de esgotamento sanitário, uso inadequado e sem controle de agrotóxicos e fertilizantes; disposição inadequada de resíduos (Pinheiro, 2015).

A expansão urbana, de maneira desordenada, desrespeita as restrições do meio natural e favorece o surgimento de ocupações irregulares. Assim, o disciplinamento do uso e da ocupação da bacia é o meio mais eficiente de controle dos recursos hídricos (Vaeza *et al.*, 2010). Os impactos mais significativos são decorrentes da aproximação e intervenção antrópica nos mananciais hídricos e ausência da mata ciliar, que acarretam alterações nos parâmetros de qualidade de água. O contínuo acompanhamento da população e do planejamento urbano se faz necessário, contribuindo para mitigar os impactos ocorridos e atenuar os que possam ocorrer (Garcia *et al.*, 2020).

No Brasil, a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) - Lei n.º 6.938/1981, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) - Lei 9.433/1997, a Lei de Crimes Ambientais – Lei n.º 9.605/1998, a Lei n.º 14.026, de 2020, conhecida como o marco regulatório do saneamento básico brasileiro, e o Código Florestal Lei n.º 12.651/2012, têm como objetivo

principal instituir regras que permitam o desenvolvimento sustentável por meio de mecanismos e instrumentos capazes de conferir ao meio ambiente maior proteção.

A Organização das Nações Unidas (ONU) lançou em 2015 os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma agenda de sustentabilidade adotada pelos países-membros da ONU para ser cumprida até 2030. Conforme o relatório oficial da ONU, o objetivo número 6 é “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos”. Neste objetivo, estão definidas como metas a distribuição de água de forma igualitária para a população mundial, a melhoria da qualidade da água, o fim da defecção a céu aberto e a garantia de saneamento para todos.

O estudo da vulnerabilidade contribui para a compreensão dos riscos que os diferentes grupos sociais experimentam ao serem submetidos aos perigos naturais de mesma intensidade (Braga; De Oliveira; Givisiez, 2006). Diversos estudos analisaram a vulnerabilidade dos recursos hídricos no Estado do Ceará, a exemplo de Pinheiro (2003), sobre a vulnerabilidade do sistema estuarino do rio Mal Cozinhando, no município de Cascavel, Lima (2020) na bacia hidrográfica do rio Acaraú, onde as águas sofrem degradação pelo uso de agrotóxicos nas áreas de expansão agrícola, ausência de saneamento nas comunidades às margens dos rios. Nos sertões, na bacia do Alto Jaguaribe, foi identificada vulnerabilidade ambiental de média a alta, principalmente associadas à degradação e desertificação nas bacias (De Souza Pinheiro, 2003). O estudo de Crispim e Souza (2016), na bacia do Pacoti, identificou problemas ambientais na bacia, alertando sobre a expansão das áreas de risco nas vertentes da Serra de Baturité, um dos locais também de estudo desta tese.

As investigações acerca da vulnerabilidade são instrumentos que clarificam a leitura da realidade no entorno da organização espacial de ativos em um dado espaço geográfico (Olímpio; Zanella; Santos, 2017). É desta maneira, que a sociedade pode perceber os riscos e as oportunidades do seu ambiente e como o conhecimento desses aspectos contribui para a tomada de decisão sobre a gestão dos recursos.

Para tanto, o estabelecimento de índices/indicadores ou padrões básicos de informação/medição, devidamente articulados com objetivos claros de monitoramento (e do uso final da informação coletada/sistematizada), constitui a espinha dorsal de qualquer sistema de monitoramento (Vieira; Studart, 2009). Representando um instrumento adequado, agregando diversas informações referentes à situação econômica, social e ambiental de um determinado espaço geográfico em um período (Freitas *et al.*, 2013).

2.2 Potencialidades da Ciência de Dados na Conservação dos Recursos Hídricos.

A gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos é de vital importância para a humanidade (IPCC, 2022). Em um mundo onde a escassez de água já é uma realidade, o uso de dados precisos e relevantes é fundamental para tomadas de decisões para garantir a disponibilidade contínua desse recurso. Como uma ferramenta indispensável nesse processo, a ciência de dados emergiu desempenhando um papel vital na melhoria do gerenciamento de recursos hídricos, fornecendo dados confiáveis para previsão, monitoramento e implementação de processos de controle com base em informações relevantes para a gestão (Saldanha; Barcellos; Pedroso, 2021).

A ciência de dados pode ser usada para melhorar o gerenciamento de recursos hídricos utilizando big data, análises avançadas e tecnologias inteligentes para otimizar custos e resolver ineficiências operacionais (Pelmez, 2020). O termo “*big data*” no ambiente acadêmico tem deixado de ser uma novidade, tornando-se mais comum em publicações científicas e em editais de fomento à pesquisa (Global Grand Challenger, 2018). A *big data* propõe e apresenta estratégias para extração, transformação e carga dos dados, modelagem, construção e avaliação de algoritmos descritivos e preditivos, visualização de grandes quantidades de dados dos modelos em ambientes de produção para a tomada de decisão, entre outros (Saldanha; Barcellos; Pedroso, 2021).

O que importa na definição de big data não é o volume ou mesmo a velocidade da produção de dados, mas a complexidade estrutural desses dados (variedade), qualidade e o poder computacional necessário para analisá-los integralmente (Leonelli, 2022). As bases de dados demográficos, mapeamentos temáticos dos recursos naturais, economia, saneamento básico, sistemas de informação de saúde, recenseamentos de acesso livre, por exemplo, são as principais fontes de dados para o desenvolvimento da ciência de dados. Essas bases, fruto de pesquisas, apresentam um respeitoso volume de dados, introduzindo complexidades para a sua análise (Saldanha; Barcellos; Pedroso, 2021).

A integração desses dados em um ambiente único facilita a consulta e permite uma análise holística e uma tomada de decisão embasada em informações consistentes pela gestão pública (Falsarella; Silva; Mariosa, 2022), bem como trata do direito da sociedade à informação pública, estabelecidos na Constituição Federal (BRASIL, 1988), na Lei de Acesso à Informação Lei Federal n.º 12.527/2011 (Brasil, 2011), e na Política Nacional dos Recursos Hídricos, Lei

n.º 9433/1997 (Brasil, 1997). Esta última define diretrizes para a gestão integrada dos recursos hídricos e aborda a necessidade de informações sobre recursos hídricos para a tomada de decisões, estabelecendo a obrigatoriedade dos poderes executivos estaduais e do Distrito Federal, criar e gerir um Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Os Estados Unidos, é um dos grandes exemplos de uso de Big Data para armazenamento e compartilhamento de informações científicas na área ambiental, a exemplo dos produtos disponibilizados pelos projetos USGS, ARM e a NOAA, como os dados SRTM, que é amplamente utilizado no Brasil por órgãos de governo nas três esferas administrativas e pela comunidade científica.

No Brasil se pode destacar as bases de dados públicos fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE) como o Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA), o SIDRA e Malha territorial, o MAPBIOMAS.org, o GEOSGB do Serviço Geológico do Brasil- (GEO-SGB), o Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), o Sistema nacional de informações sobre Saneamento (SNIS) e o Geo-Portal da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), dentre outros exemplos exitosos. No Estado do Ceará destaca-se a base do Ceará em Mapas do Instituto de Pesquisa e Estatística Econômica do Ceará (IPECE), Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará, da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), e da Plataforma Estadual de Dados Espaciais Ambientais do Ceará (PEDEA-CE) lançada em 2022.

O aproveitamento desses dados para a tomada de decisão vai além da visualização que hoje é muito facilitada pelas plataformas de WebGis. A capacidade do pesquisador de avaliar a veracidade, qualidade e acurácia é condição *sine qua non* para o bom uso dessas informações, que vai de encontro a ética na ciência.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliados a outras técnicas de geoprocessamento, são indispensáveis para análise e geração de produtos. Essas ferramentas permitem a manipulação de grande quantidade de dados e informações georreferenciados, bem como a representação cartográfica dos mesmos, possibilitam a tomada de decisão, como também uma economia de recursos e tempo (Zanata *et al.*, 2012).

2.3 Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão

A avaliação de áreas prioritárias significa uma decisão entre as alternativas encontradas, levando em consideração critérios, que servirão como uma base mensurável e avaliável para

uma tomada de decisão. Assim, para ações de conservação em bacias hidrográficas, deve se ter uma análise preliminar das áreas, levando em consideração aspectos físicos, sociais e econômicos, visando sempre a melhor estratégia de escolha (Adem Esmail; Geneletti, 2018).

Tomar decisões é um dos momentos mais críticos na administração de qualquer empreendimento humano e está em volta das limitações humanas, das redes sociais com seus aspectos de afetividade, relacionamentos e interesses de toda complexidade organizacional. Haverá aqueles que preparam à exaustão para esse momento, outros que preferem a intuição e a emergência natural de uma luz sobre o problema em questão
(Yu et al., 2011, p.5).

Os processos de tomada de decisão relacionados aos recursos hídricos, são imbuídos de uma atmosfera de complexidade, resultante da presença de uma riqueza de informações, envolvendo diversos atores, cada um tendo seu próprio sistema de valores e objetivos múltiplos, às vezes contraditórios (Silva, 2012). No sentido de que, geralmente, não é possível encontrar uma alternativa que seja melhor do que outras em todos os critérios ao mesmo tempo.

A Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD) recorre a um conjunto de ferramentas e métodos matemáticos utilizados para facilitar a avaliação e opções (ou ações potenciais) em cada um dos critérios e a ponderação relativa destes e, depois, para fazer a síntese das avaliações parciais nos critérios (BELTON; STEWART, 2002).

Na escolha de áreas prioritárias à conservação é necessária a avaliação de critérios que levam em consideração parâmetros ambientais, sociais e econômicos, a fim de garantir qualidade ambiental da população rural. Dessa forma, o ambiente SIG tem a capacidade de mostrar e manipular os dados de forma para simplificar a análise.

O uso da técnica de decisão multicritério aliadas ao SIG reflete num processo de combinação e transformação de um conjunto coerente de critérios, em uma decisão final, permitindo também interpretar as diferentes consequências de uma ação. Esse processo depende da utilização de dados georreferenciados, das concepções dos tomadores de decisão, pautadas em regras específicas e da manipulação desses dados (Malczewski, 2004).

Está sendo cada vez mais utilizada a análise de decisão por multicritério para a conservação da natureza (Adem Esmail; Geneletti, 2018). Existem inúmeros exemplos de aplicações da técnica na literatura (De Almeida *et al.*, 2020); (Ikematsu *et al.*, 2016); (Infosanba, 2020); (Hajkowicz; Collins, 2007).

Dentre os métodos matemáticos mais utilizados em análises multicritério, estão as abordagens booleana ou fuzzy (Lopes; Silva, 2022). No método Booleano os critérios são reduzidos a afirmações lógicas, muito utilizado em decisões extremas, onde as opções são binárias e permitem que os fatores recebam pesos em relação a sua importância relativa ao objetivo do estudo (Cartolano *et al.*, 2022).

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) foi desenvolvido por Thomas Saaty em 1980 para auxiliar na resolução de problemas complexos, ajudando os decisores a estabelecer as prioridades e tomar a melhor decisão frente ao problema. Baseia-se em critérios qualitativos e quantitativos, tendo como foco a análise do julgamento estabelecido pelo especialista ou decisor (Carvalho, 2020).

Ainda sobre o método acima mencionado, é a técnica mais utilizada para o apoio à decisão, pois visa orientar o processo intuitivo, ou seja, com fundamentação no conhecimento e na experiência; quando não se tem informações quantitativas sobre o desempenho de uma variável em função do determinado critério, o método dependerá de julgamentos estabelecidos por especialistas ou decisores; e resulta numa medida global para cada uma das ações potenciais ou alternativas, priorizando-as ou classificando-as (OLIVEIRA; BELDERRAIN, 2008).

O *Decision Support Systems Glossary* (DSS, 2006) define AHP como “uma aproximação para tomada de decisão que envolve estruturação de multicritérios de escolha numa hierarquia, avaliando a importância relativa desses critérios, comparando alternativas para cada critério, e determinando um ranking geral das alternativas”.

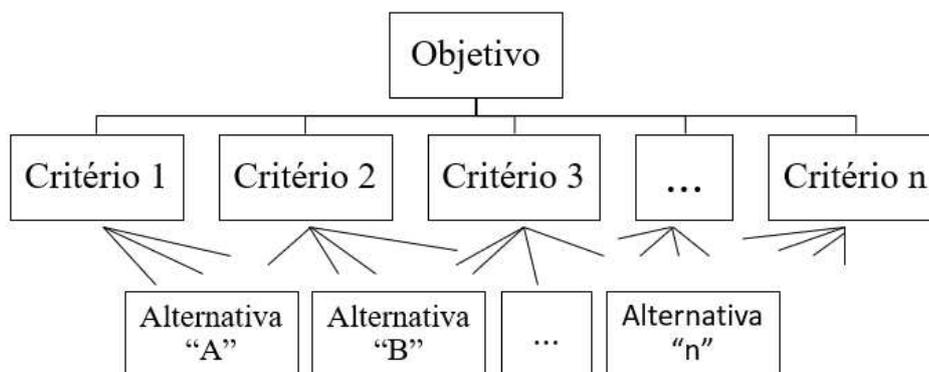
Para organizar e produzir as prioridades no processo de tomada de decisão, Saaty (1991) separa nas seguintes etapas:

1. *Definição do problema:* inicialmente é definido a problemática, expondo possíveis suposições refletidas, identifica as partes envolvidas, checar como estas definem o problema e suas formas de participação no AHP (OLIVEIRA; BELDERRAINS, 2008).
2. *Decomposição do problema:* nesta etapa é estruturado o problema de criar uma estrutura hierárquica, na qual deve-se posicionar objetivos, critérios e alternativas.
3. *Estabelecer prioridades:* após estruturar o problema, esta etapa é baseada na percepção humana de relacionar objetos e situações observadas, comparando-as par a par em um determinado julgamento. Esse processo ocorre em forma de entrevista, a fim de identificação dos critérios de maior peso para, assim, atingir o objetivo.

4. *Síntese*: é obtida de por meio de combinações lógicas e avaliativas de prioridades frente aos critérios estabelecidos no problema, onde os julgamentos são distribuídos pela hierarquia, e assim sendo possível o recebimento das preferências do especialista.
5. *Análise de sensibilidade*: visa avaliar as possíveis fragilidades e o nível de consistência que podem ser geradas ao mudar a prioridade de um critério. Portanto, é feito pequenos ajustes nos pesos dos critérios, assim é possível constatar qual o seu impacto no resultado. Quando o critério apresentar sensibilidade é necessário a realização de uma nova análise com o especialista ou decisor.
6. *Interação*: nesta etapa é feita a repetição de todas as anteriores, cujo objetivo é a revisão, para assim compreender melhor o problema através do modelo desenvolvido.

A hierarquização do problema é defendida por Wernke e Bornia (2001) como sendo a forma representativa que possibilita o decisor ter uma “visualização do sistema todo e seus componentes, bem como interações destes componentes e os impactos que os mesmos exercem sobre o sistema”. Para firmar isso, na Figura 3 pode-se observar a estrutura básica da ordenação e compreender de maneira geral o problema em relação a sua complexidade.

Figura 3 - Estrutura básica da hierarquia.



Fonte: Adaptado Martins; Souza e Barros, 2009.

Para utilizar o método AHP é necessária uma escala que indique quantas vezes um elemento é mais importante ou dominante que o outro, ou em relação aos critérios quando comparados (Carvalho, 2020).

Conforme Saaty (1991), a escala recomendada é mostrada no Quadro 1, que varia de 1 a 9, sendo 1 a indiferença do critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre o outro.

Quadro 1 - Escala Fundamental de Saaty.

Escala numérica	Escala verbal	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra, sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Adaptado de Saaty (1994).

3 MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DA TERRA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO NORDESTE BRASILEIRO

3.1 Introdução

As mudanças no uso da terra são questões globais sérias e estão alterando rapidamente a dinâmica do ambiente (Jiang; Tian, 2010; Mallupattu; Reddy, 2013; Thakur *et al.*, 2021; Galata, 2020; Da Silva Costa *et al.*, 2022), gerando uma série de incertezas em relação à sustentabilidade e resiliência. Determinados tipos de usos de solo, a exemplo do desmatamento da mata ciliar, associados às características da paisagem como solo, declividade, escoamento superficial, vegetação, temperatura, regime hídrico e resistência do solo podem causar processos erosivos, assoreamentos e inundações (Andrade *et al.*, 2017; Chaves *et al.*, 2019; De Araújo *et al.*, 2023; Spröl; Ross, 2004), e até alterações na qualidade da água dos mananciais nas bacias hidrográficas (Chaves *et al.*, 2019; Gossweiler *et al.*, 2021). A poluição pode ocorrer devido à contaminação por fontes difusas, e a perda de proteção devido à presença de barreiras biológicas, a exemplo da vegetação próximas às nascentes e drenagens (Correia; Oliveira; Araújo, 2020).

A presença da vegetação ciliar influencia diretamente na bacia hidrográfica, já que as suas funções e efeitos positivos podem refletir na qualidade dos recursos hídricos e no equilíbrio do meio ambiente (Correia; Oliveira; Araújo, 2020). A qualidade dos recursos hídricos por sua vez, será um fator importante para a segurança hídrica, alimentar e saúde da população que se abastece desse recurso (Soares; Souza e Souza, 2020). A pressão das atividades antrópicas no século passado reduziu amplamente a cobertura vegetal em todo o mundo (Thakur *et al.*, 2021). No Brasil, o Código Florestal Federal, Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012, às matas ciliares são Áreas de Preservação Permanente (APPs) e o seu diagnóstico são importantes instrumentos para a gestão dos recursos hídricos (Almeida; Ferreira Júnior; Bayer., 2018).

A análise histórica da cobertura e usos da terra (Zebende; Weckmüller; Vicens, 2019), gera informações importantes para a tomada de decisões e utilização adequada dos recursos naturais (Mallupattu; Reddy, 2013; Negassa; Mallie; Gameda, 2020; Chowdhury; Hafsa, 2022), pois permite identificar e monitorar as variáveis que controlam os processos naturais, culturais e socioeconômicos que induzem tais mudanças (Badia *et al.*, 2019; Campos;

Boada, 2007; Rudel *et al.*, 2005; Sala *et al.*, 2000; Sauri Pujol; Boada Junca, 2002; Turner II; Lambim; Reenberg, 2007).

A bacia hidrográfica é a unidade territorial adotada para fins de planejamento da gestão ambiental do Brasil (BRASIL, 1997b). Ao longo de sua extensão pode apresentar distintos tipos de conflitos e impactos, derivados da produção social, além dos seus divisores de água (Carvalho, 2020). Entender esses processos é urgente, em um cenário de escassez hídrica pelo crescimento na duração das secas no Nordeste brasileiro pelas mudanças climáticas (IPCC, 2021), pois a busca por áreas com disponibilidade hídrica, temperaturas mais amenas e solos produtivos será cada vez maior.

A disponibilidade de imagens de satélites, *Big Data*, softwares de acesso livre, aprimoramento das técnicas de interpretação e processamento digital de imagens, potencializa a sua utilização como ferramentas eficazes para avaliar as características e padrão, cobertura e uso da terra ao longo do tempo, contribuindo para a tomada de decisão e investimentos nas ações de conservação da bacia hidrográfica (Almeida; Ferreira Júnior; Bayer., 2018; Gameiro *et al.*, 2022), principalmente em áreas com menor disponibilidade de recursos, como o semiárido nordestino. Em face do exposto, o objetivo deste estudo é identificar e analisar quais variáveis controlaram a evolução dos usos e cobertura da terra em três microbacias localizadas em unidades geoambientais distintas inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Choró, nos últimos 10 anos.

3.2 Material e Métodos

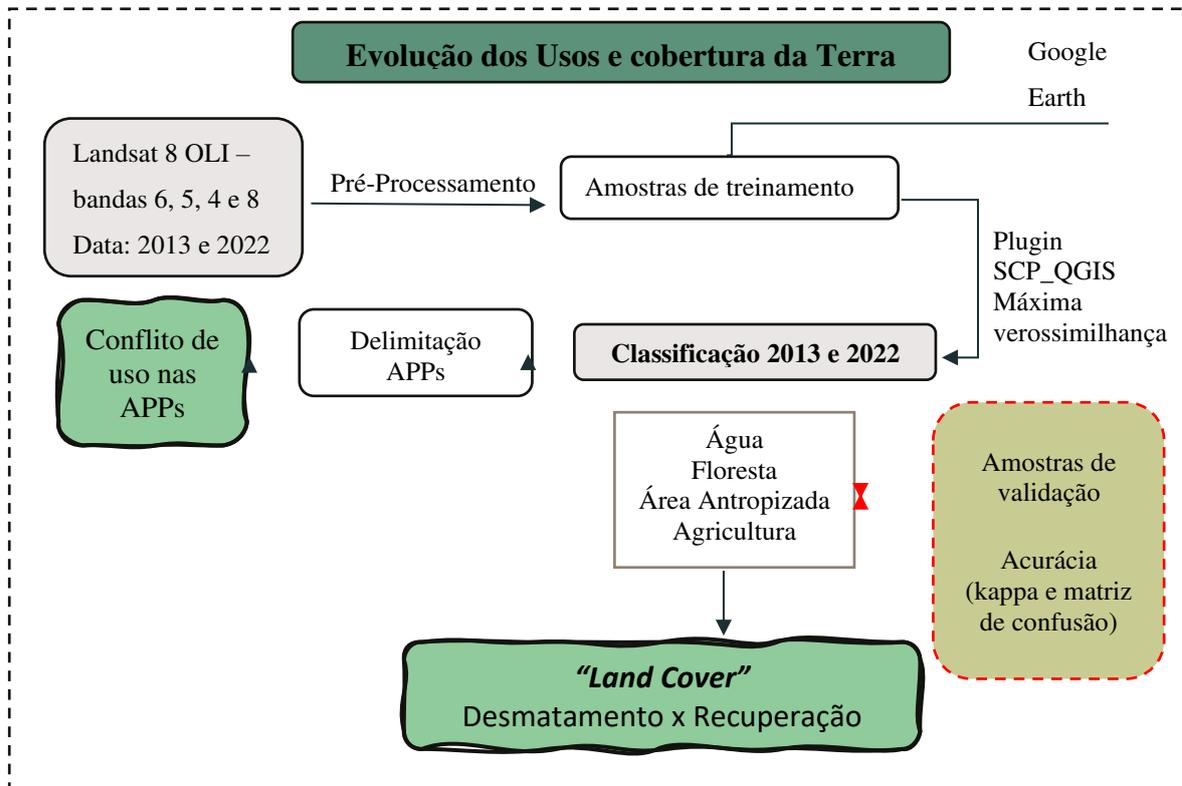
As etapas metodológicas para a avaliação da evolução dos usos e cobertura da terra estão demonstradas na Figura 4. As bases cartográficas utilizadas para o estudo foram fornecidas por diversas instituições públicas e estão resumidas no Quadro 2.

Quadro 2 - Síntese da base de dados utilizada no presente estudo.

Bases Cartográficas	Escala	Ano	Fonte
Limites Territoriais	1:250.000	2021	IBGE
Compartimentação Geoambiental	1:600.000	2019	IPECE
Hidrografia	1:100.000	2015	COGERH
Modelo Digital de Elevação - NASADEM	30m	2020	NASA
LandSat 8 – OLI Bandas 6, 5 e 4. Banda PAN-8	15m	2013 e 2022	USGS

Fonte: Autora.

Figura 4 - Etapas metodológicas da análise do uso e cobertura da terra.



Fonte: Autora.

Na elaboração dos mapas de uso e ocupação da terra nos últimos 10 anos foram utilizadas as imagens do Satélite *Landsat 8*, *sensor Operational Land Imager - OLI*, datadas de 10/07/2013 e 27/07/2022, adquiridas de forma gratuita junto ao site do *United States Geological Survey (USGS)*, (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Foram utilizadas as composições coloridas das bandas RGB-654, fusionadas com a banda 8 pancromática, permitindo uma resolução espacial de 15m. O Datum utilizado foi SIRGAS 2000 com coordenadas UTM zona 24 sul.

A classificação das imagens foi realizada com o *plugin Semiautomatic Classification Plugin (SCP)* do QGIS, que é um aplicativo para classificação supervisionada, que vem sendo frequentemente utilizado e apresenta adequado desempenho na classificação (Congedo, 2014; Pereira; Guimarães, 2019). O SCP opera com amostras de *pixels*, delimitadas por polígonos, recebendo o nome de *Region of Interest (ROI)* para cada classe que se deseja mapear, e os *pixels* são classificados um a um, de acordo com as semelhanças espectrais entre ROI's e *pixels* (Pereira; Guimarães, 2019).

Neste estudo foram definidas quatro classes: Água, Floresta, Áreas Antropizadas (vilas, áreas urbanas, estradas, solo exposto, solo descoberto para preparação do plantio)

Chowdhury; Hafsa, 2022), e Áreas Agrícolas (áreas com plantas já em crescimento). O algoritmo utilizado para classificação no SCP foi o Máxima Verossimilhança, que classifica os pixels como pertencentes à classe provável, baseando-se em funções de densidade de probabilidade derivadas da média e da covariância dos valores de pixels para cada ROI (Congedo, 2014).

O coeficiente de Kappa é amplamente utilizado na validação dos algoritmos de classificação (Chowdhury; Hafsa, 2022). Neste estudo, a precisão do mapeamento de uso e cobertura da terra foi verificada pela matriz de confusão e pelas métricas de acurácia derivadas do coeficiente de Kappa que são: Exatidão Global e índice Kappa (Badia *et al.*, 2019; Barbosa; Valladares, 2022; Chowdhury; Hafsa, 2022). As amostras para validação foram coletadas utilizando-se a mesma técnica descrita para coleta de ROI's, mas com o uso de imagens de alta resolução no Google Earth Pro. Os níveis de desempenho do índice Kappa podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1 - Intervalos de aceitação dos resultados dos índices Kappa.

Índice Kappa (k)	Desempenho
< 0	Péssimo
$0 < k \leq 0,2$	Ruim
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Bom
$0,6 < k \leq 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k \leq 1$	Excelente

Fonte: (Landis; Koch, 1977)

Como uma forma de evitar os conflitos de usos e ocupação da terra referentes às atividades antrópicas e a preservação dos recursos hídricos (rios, lagoas, nascentes e reservatórios), foram criadas as Áreas de Preservação Permanente - APP, instituída pela Lei n.º 12.651/2012, referente ao Novo Código Florestal brasileiro. A legislação brasileira é bem clara quanto a delimitação dessas áreas e o tamanho das faixas de APP (Brasil, 2012).

Para a delimitação das áreas de preservação permanente de cursos d'água, foi utilizada a base da rede de drenagem, e as nascentes foram obtidas por meio da marcação de pontos nas extremidades de todos os canais de 1ª ordem, definidos por meio da hierarquização fluvial.

Com base nos parâmetros estabelecidos na Lei n.º 12.651/2012 para definição das faixas de preservação e utilizando a função *buffer no QGIS*, foram delimitadas automaticamente as Áreas de Preservação Permanente dos cursos d'água e nascentes com as faixas de 30m e 50m, respectivamente.

As alterações e dinâmicas da cobertura da terra foram realizadas a partir da construção da matriz de transição utilizando a função "*land cover*" do plugin SCP, conforme mencionado anteriormente, permitindo analisar as mudanças no período de 2013 a 2022. Foi considerado como desmatamento as áreas que antes eram florestas e passaram a ser áreas antropizadas ou agrícolas. Já para a classe reflorestamento ou regeneração florestal, foi considerado tudo que antes era atividade antrópica e passou a ser floresta.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Análise do Uso e Cobertura da Terra nas Microbacias

Os mapas com as classes geradas pela classificação supervisionada têm uma acurácia geral superior a 94%, com índice de Kappa acima de 0,8 para todas as imagens das microbacias nos anos de 2013 e 2022, e B3 no ano de 2013, classificando-as como excelente (Tabela 2). Para todas as imagens os resultados são aceitáveis permitindo futuros estudos (Chang *et al.*, 2021; Gossweiler *et al.*, 2021).

Tabela 2 - Acurácia dos mapas de uso e ocupação da terra nas três Microbacias nos anos de 2013 e 2022. B1: Bacia Serra; B2: Bacia Sertão; B3: Bacia Litoral.

Microbacias/Ano	Kappa	Qualidade	Exatidão Global
<i>B1 - 2013</i>	0,87	Excelente	94,23
<i>B1 - 2022</i>	0,98	Excelente	99,13
<i>B2 - 2013</i>	0,9	Excelente	96,58
<i>B2 - 2022</i>	0,93	Excelente	97,47
<i>B3 - 2013</i>	0,88	Excelente	95,49
<i>B3 - 2022</i>	0,87	Excelente	94,58

Fonte: Autora.

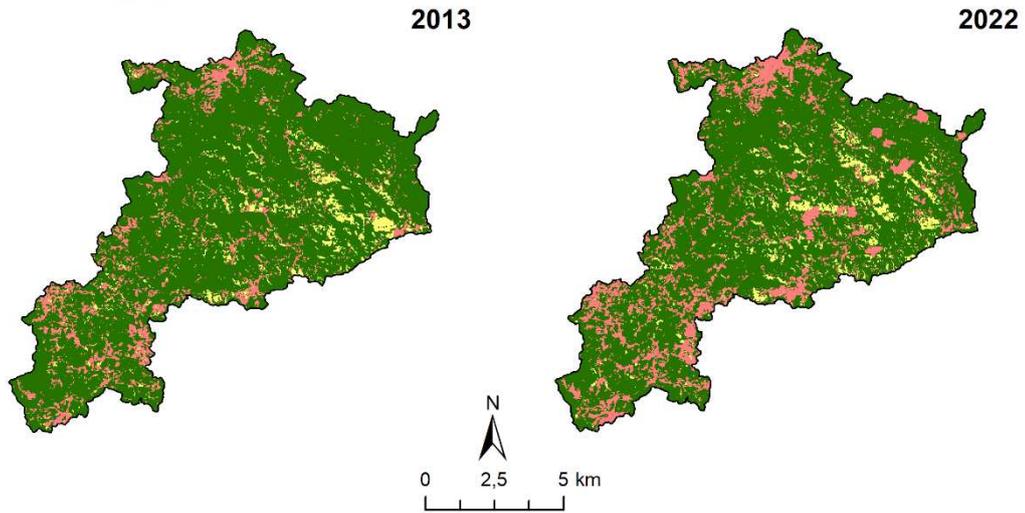
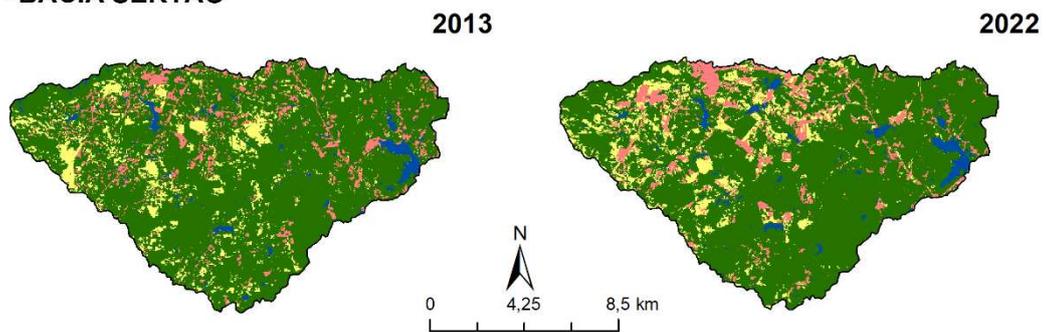
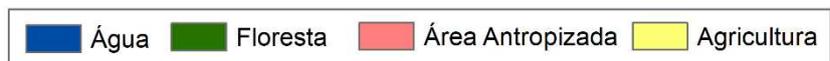
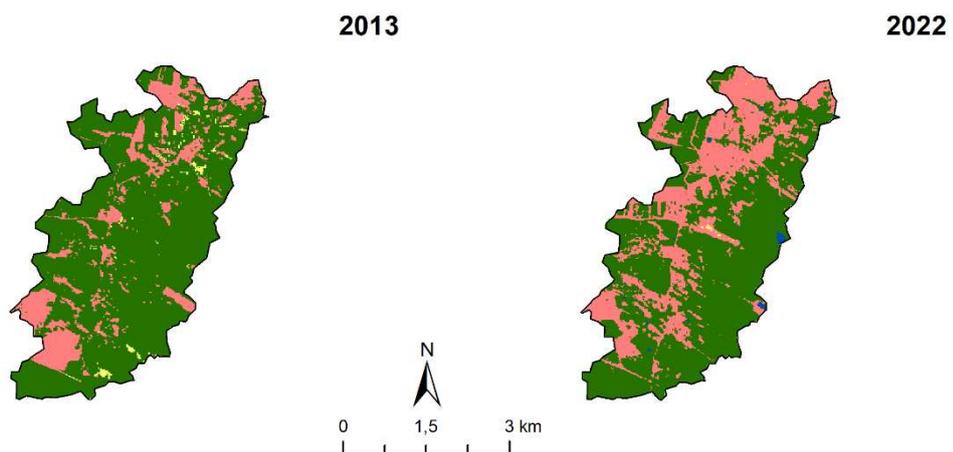
No ano de 2013 os espaços ocupados pelas florestas, áreas antropizadas e agricultura na bacia B1 correspondiam às de 8.209, 1.185 e 506 ha, respectivamente (Figura 5 e Tabela 3). Ao comparar com o ano de 2022, observou-se uma redução de 7,62% das áreas de florestas, com crescimento de 51,46% das áreas antropizadas e 4% das áreas agrícolas,

respectivamente. O setor sudoeste da bacia foi o que apresentou as maiores taxas de antropização, onde está inserido o município de Aratuba. A área da classe água variou de 6,21 ha a 2,21 ha.

Na APA do Maciço de Baturité a especulação imobiliária impulsionada pelo turismo é crescente, ao passo que as áreas destinadas às atividades agrícolas reduziram (Brito; Santos; Silva, 2021). Destaca-se que nos principais municípios localizados na microbacia, as atividades agropecuárias, em 2012, correspondiam a 15,22% do PIB, ao passo que a indústria e serviços correspondiam a aproximadamente 9,7% e 75,05%, respectivamente (Ceará, 2019). Essa é uma tendência mundial, enquanto a área total de cobertura vegetal em diferentes zonas do planeta, continua a diminuir, e a área total de agricultura e antropização aumenta (BADIA et al., 2019). Nos setores leste e sudoestes da microbacia houve crescimento da cobertura florestal. Essa informação corrobora com o estudo de Brito, Santos e Silva, 2021 que identificou, entre os anos de 2015 a 2020, que algumas áreas com vegetação rala diminuíram e as densas aumentaram na área da APA de Baturité.

Na bacia B2, localizada na unidade geoambiental da depressão sertaneja, houve a redução de 3,30% das áreas classificadas como florestas, equivalente a uma redução de 370,84 ha de vegetação natural. A área antropizada correspondia, em 2013, a 1157,42 ha (8,20%) de toda microbacia do Sertão. Em 2022, esta área refletiu em 1304,98 ha (9,24%), havendo uma taxa de crescimento de 12,75%.

Figura 5 – Uso e Ocupação da Terra nos anos de 2013 e 2022

B1 - BACIA SERRA**B2 - BACIA SERTÃO****B3 - BACIA LITORAL**

Elaborado por: Laldiane de S. Pinheiro
Datum SIRGAS 2000 / Coordenadas UTM Zona 24S

Fonte: Autora.

Entre 2013 e 2022, a taxa de crescimento das áreas agrícolas foi de 13,74%, havendo um aumento de 185,81 ha destinado a essa atividade. Houve um aumento de pequenos reservatórios na zona rural, o que pode explicar o crescimento de 10% da classe água. As maiores alterações foram observadas no setor noroeste da bacia, próximos aos corpos hídricos, como reservatórios. Como pode ser observado, as áreas de florestas se mantiveram com a representação de mais de 70% do tipo cobertura espacial da Bacia B2 (Tabela 3). Esses dados corroboram com os encontrados no Sertão Pernambucano, no qual a paisagem natural compõe 61% dos tipos de usos da terra, com o predomínio das áreas com caatinga densa (32,6%) em relação às áreas de caatinga aberta (26,5%), vide Accioly *et al.*, (2017). Foi observada uma substituição das áreas agrícolas por áreas antropizadas, associadas à expansão urbana nas áreas mais próximas aos recursos hídricos, provavelmente.

Tabela 3 - Quantificação das categorias de uso da terra entre 2013 e 2022

Classes	2013		2022		Taxa de Crescimento (%)	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%		
B1:	Água	6,21	0,06%	2,21	0,02%	-64,49
Bacia	Floresta	8208,83	82,87%	7583,00	76,56%	-7,62
Serra	Área Antropizada	1184,60	11,96%	1794,20	18,11%	51,46
	Agricultura	505,60	5,10%	525,85	5,31%	4,01
Total		9905,24	100%	9905,24	100%	
B2:	Água	370,37	2,62%	407,86	2,89%	10,12
Bacia	Floresta	11242,37	79,61%	10871,53	76,98%	-3,30
Sertão	Área Antropizada	1157,42	8,20%	1304,98	9,24%	12,75
	Agricultura	1351,55	9,57%	1537,36	10,89%	13,75
Total		14121,72	100%	14121,72	100%	
B3:	Água	0,07	0,004%	6,1	0,4%	8966,67
Bacia	Floresta	1203,32	80,03%	998,3	66,41%	-17,03
Litoral	Área Antropizada	281,14	18,70%	479,1	33,07%	76,83
	Agricultura	19,15	1,27%	1,8	0,12%	-90,72
Total		1503,68	100%	1503,68	100%	

Fonte: Autora.

A área antropizada na bacia B3 (Litoral), em 2022, corresponde a 33,07% dos usos da terra na microbacia. Em 9 anos houve um acréscimo de área de 216 ha. A redução das áreas agrícolas foi de 90,72%, equivalente a uma redução de 17,4 ha, e as áreas de florestas reduziram a uma taxa de 17,03%. As áreas de florestas estão associadas à vegetação predominantemente dos tabuleiros costeiros, com transição de espécie da caatinga e cerrado (ZEE, 2022). As áreas classificadas como água aumentaram de 0,07 ha para 6,1 ha. Além do aumento de micro

barramentos, os pixels classificados como água após verificação em imagem de alta resolução, correspondem, em sua maioria, aos viveiros de carcinicultura instalados.

Na região do baixo Jaguaribe no período de 1997 a 2010 ao longo da bacia houve um aumento da área de fazendas de camarão de 295 para 1.985 ha, com diminuição dos manguezais (Queiroz *et al.*, 2013). Essa mesma tendência no aumento na classe de corpos d'água associados às fazendas de camarão, usando imagens de satélite e técnicas de processamento digital com o uso de NDVI foram identificados no Baixo Curso do Rio Jaguaribe entre 1999 e 2015 por (Gameiro *et al.*, 2022). No Litoral do Piauí a vegetação manteve estabilidade entre os anos de 2000 e 2015, mas mostrou também que a água teve um aumento significativo, indicando a expansão da aquicultura (Barbosa; Valladares, 2022).

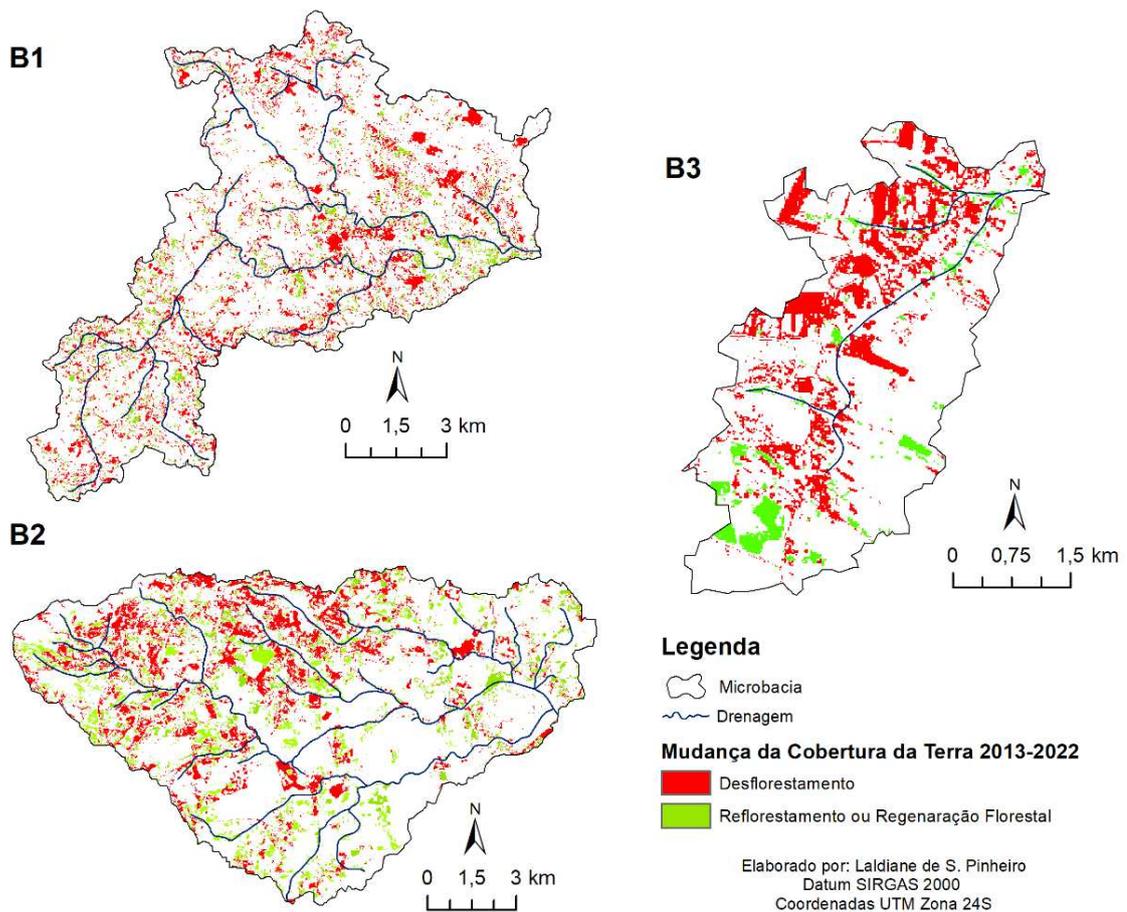
Essas informações corroboram com os dados do MapBiomas - que utilizou imagens de satélite Landsat de 1985 a 2019 para todo o Brasil dos trinta maiores municípios com área de aquicultura, nove estão no Ceará (Souza *et al.*, 2020). Os setores norte e noroeste da microbacia, próximos à linha de costa, foram os que apresentaram as maiores alterações espaciais dos tipos de uso, principalmente as associadas às áreas antropizadas. Esse resultado pode ser explicado pela expansão de empreendimentos turísticos e imobiliários em regiões urbano-litorâneas no Nordeste do Brasil, nos últimos anos (Pereira; Abreu, 2022).

Considerando que mesmo com as taxas de redução da cobertura florestal nas microbacias, estudadas, ela continua predominante, correspondendo a uma faixa de 66% a 77% da área de cobertura das bacias. No intuito de avaliar as transformações apenas nessa classe, foram analisados os processos de desflorestamento (Zaqueo; Quissindo, 2021) e os de reflorestamento ou regeneração florestal (Chazdon, 2012; Ferreira *et al.*, 2022; Salomão; Brienza Júnior; Rosa, 2014).

Registrou-se um aumento das áreas de reflorestamento e/ou regeneração florestal de aproximadamente 502,85 ha, 1331,31 ha e 74,453 ha, para microbacias B1, B2 e B3. Foi possível identificar as áreas (Figura 6) nas quais as florestas se regeneram, porém, as imagens e modelos aplicados não possibilitam diferenciar se foi por técnicas com manejo ou por regeneração natural. Apesar dos ganhos de áreas de floresta, as áreas de desflorestamento foram maiores nas três microbacias. Na B1, localizada na serra, a perda estimada foi de 1130,56 ha, na B2 foi de 1688,20 ha e na B3 de 275,54 ha, respectivamente. Os serviços ambientais prestados pelas florestas consistem na prevenção da erosão, e carga de lenções freáticos,

produção de oxigênio, intervenção nos ciclos biogeoquímicos, conservação da biodiversidade e sequestro de carbono (Zaqueo; Quissindo, 2021).

Figura 6 – Espacialização da mudança de cobertura da terra entre os anos de 2013 e 2022. B1- Bacia Serra; B2-Bacia Sertão e B3-Bacia Litoral



Fonte: Autora.

3.3.2 Evolução do conflito de uso nas Áreas de Preservação Permanente

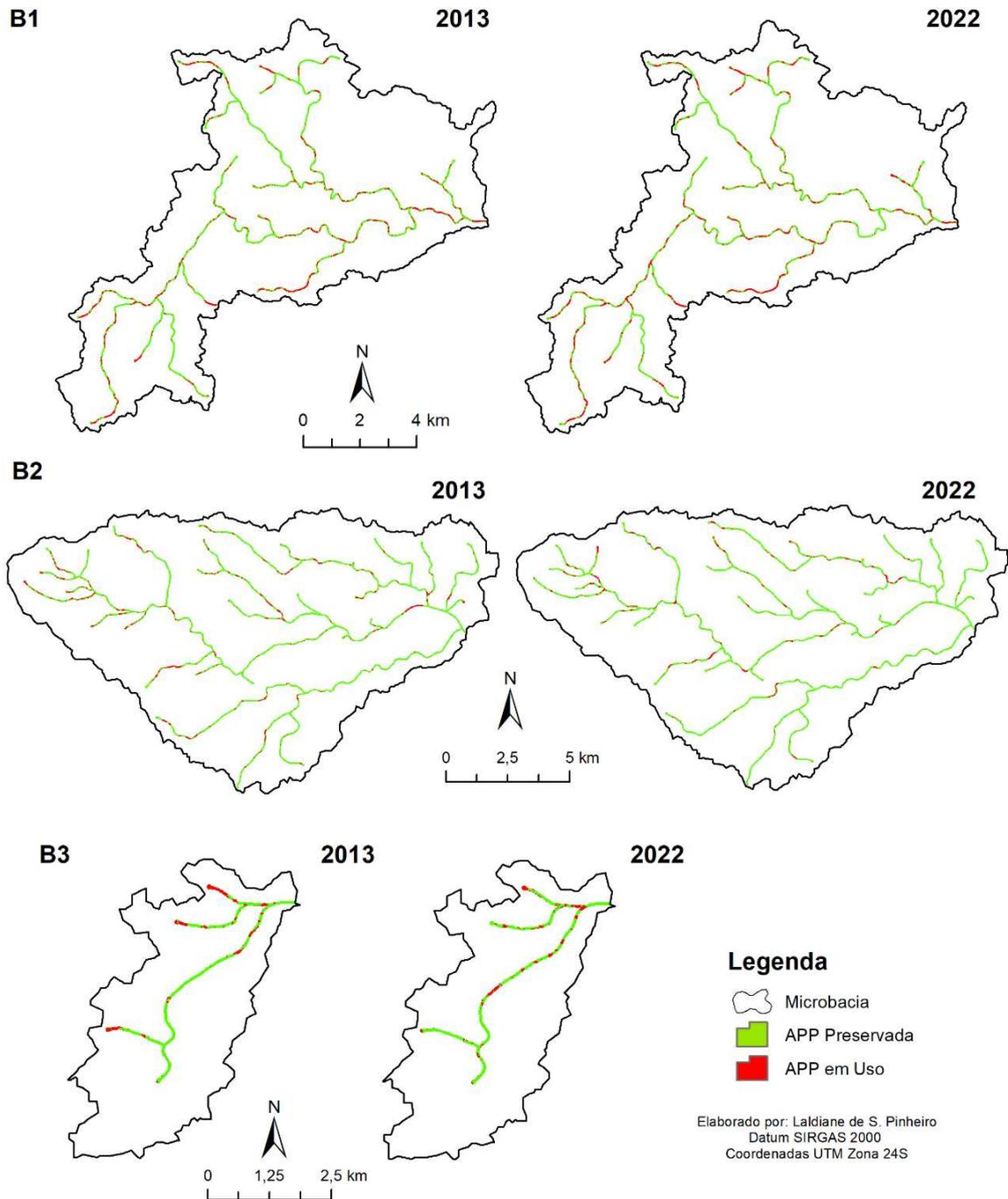
No que se refere à evolução do uso da terra nas áreas de APPs dos rios e nascentes, na bacia B1 (Figura 7) foi observado que entre 2013 e 2022, houve uma redução de 8% das áreas representadas por florestas. Em 2013 o percentual de floresta dentro das APP era de 70,39% e passou a ser 67,57%. Houve um acréscimo de 30,71% das áreas antropizadas e redução de 32,36% das áreas agrícolas. No período de 1985 e 2020, a áreas cobertas por

construções e infraestruturas a pelo menos 30 metros dos corpos hídricos (como rios e córregos) dentro de cidades passaram de 61,6 mil hectares em 1985 para 121 mil hectares em 2020, com o estado do Ceará aparecendo entre os cinco primeiros colocados com a redução de 4,19 mil ha (MAPBIOMAS, 2023). Vale destacar que existem ações de fiscalização das construções inseridas, principalmente na Área de Proteção Ambiental de Baturité-APA (Ceará, 2022). No ano de 2021 foi verificado o aumento em 51% das infrações registradas na APA (Oliveira *et al.*, 2021).

Na bacia B2 (Figura 7), localizada no sertão, as áreas florestais aumentaram em 5,23%, ao passo que as áreas antropizadas e agrícolas reduziram em 40% e 25,9%, respectivamente. Considerando que os rios inseridos na região semiárida são de regime intermitente sazonal (Pinheiro; Moraes, 2010) e existe uma densidade demográfica mais reduzida, a pressão sobre as APPs dos rios é menor, bem como nas APPs de reservatórios distantes de grandes centros urbanos, como foi visto na B2.

No litoral (B3) (Figura 7), as áreas de florestas aumentaram 2,2% e as áreas antropizadas aumentaram 12,7%. As áreas agrícolas tiveram uma redução de 97,81%. Há de se destacar que os terrenos preparados para loteamentos, podem apresentar resposta espectral semelhante às áreas em preparação para o cultivo.

Figura 7 - Conflitos de uso da terra nas áreas de preservação permanente nas microbacias. B1- Bacia Serra; B2-Bacia Sertão e B3-Bacia Litoral.



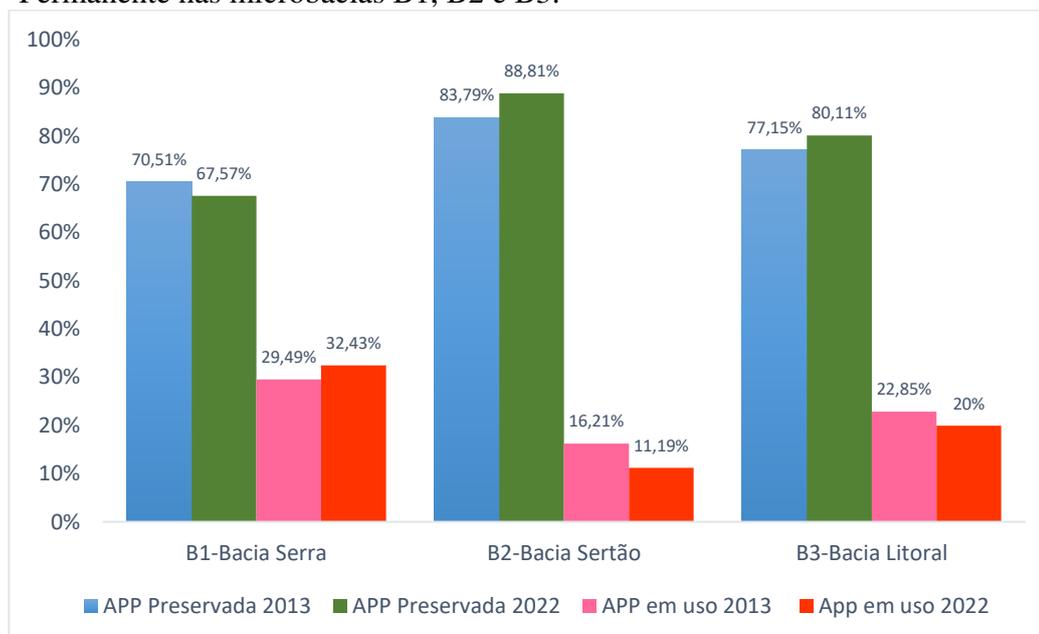
Fonte: Autora.

A B1 foi a bacia que apresentou maior percentual de áreas de conflito no uso das APP, com ocupação de 29,49% em 2013 e 32,43% em 2022, sendo o avanço das áreas antropizadas o maior responsável por esse aumento. Foi observado que os maiores conflitos estão nas APPs das nascentes e dos canais de primeira ordem (Figura 7). Os rios de primeira

ordem são os menores canais, sem tributários, desde sua nascente até a confluência (Strahler, 1954). Os canais, de ordens inferiores, estão localizados em relevo mais acidentado, com maior suscetibilidade aos processos erosivos que pode ser potencializado pela ocupação (Freitas *et al.*, 2013). Além da erosão, a ocupação antrópica pode causar o assoreamento dos canais e redução da oferta hídrica nas regiões serranas.

A Figura 8 apresenta uma síntese dos conflitos de uso existente nas áreas de preservação permanente de cursos d'água e nascente da B1, B2 e B3, sendo possível observar o percentual de APP preservada para cada bacia e as áreas com presença de uso nos anos de 2013 e 2022.

Figura 8 - Quantificação dos conflitos de usos nas Áreas de Preservação Permanente nas microbacias B1, B2 e B3.



Fonte: Autora.

O panorama apresentado merece atenção nas Bacias 1 e 3 pela tendência de crescimento das áreas antropizadas. As áreas serranas têm histórico de ocupação relacionado a atividades agrícolas típicas de climas úmidos, com agentes produtores do território (Nascimento; Souza; Cruz, 2010). O aumento dos percentuais de conflito para as áreas de preservação permanente das microbacias em estudo indica forte ligação com as formas de uso e ocupação das terras nas regiões, influenciados, principalmente, pela especulação imobiliária, expansão urbana e atividade agrícola (Nascimento; Souza; Cruz, 2010). Vale destacar que o histórico de ocupação da área da B1 remonta ao Século XVII (1680) e tem relação direta com

o processo de ocupação territorial portuguesa no Ceará, quando a região foi alcançada pelo rio Choró, depois com o apogeu da Cafeicultura em 1824 (Girão,1985) e agricultura (hortifruta). Nos últimos anos ganhou força o turismo rural (Braga e Campos, 2022), impulsionados pela proximidade com Fortaleza, capital do estado.

O conceito legal de APP relaciona tais áreas, independente da cobertura vegetal, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos e os serviços ecossistêmicos por eles oferecidos (Da Silva Costa *et al.*, 2022) O estabelecimento de um planejamento ambiental e territorial onde exista a efetiva proteção e conservação das áreas legalmente protegidas, garantem a qualidade ambiental de toda a bacia, uma vez que as práticas inadequadas de uso e ocupação do solo têm efeitos negativos sobre todo o sistema hidrográfico (Almeida; Ferreira Júnior; Bayer., 2018)

3.4 Conclusões

As imagens e o modelo de máxima verossimilhança com o Plugin SCP-QGIS possibilitaram a geração de dados sobre uso e cobertura da terra com acurácia média de 0,88, o que torna confiável o produto da classificação supervisionada. A aplicação dessa metodologia de baixo custo no monitoramento, análise e planejamento de bacias hidrográficas, considerando toda a sua diversidade de paisagens ambientais, mostra ser eficiente.

A dinâmica temporal de uso e cobertura das terras mostrou que as classes de florestas tiveram redução de área dentro das três microbacias entre os anos de 2013 e 2022, enquanto as áreas antropizadas apresentaram aumento, sendo mais expressivo na bacia B1 e B3, com um crescimento de 51,45% e 76,83%, sinalizando uma forte pressão nessas áreas.

As áreas de APP em 2013 apresentaram 70,51%, 83,79% e 77,15% de áreas conservadas na B1, B2 e B3. Já a área em desacordo com a legislação correspondeu a 29,49%, 16,21% e 22,85%. Para o ano de 2022 foi identificada maior degradação das APPs nas bacias da serra e litoral, com 32,43% e 20%, respectivamente, da área em desconformidade com a legislação. A bacia do sertão apresentou menos de 11,2% da sua APP com ocupações irregulares.

As maiores alterações no uso da terra foram observadas na serra (B1), onde o clima mais ameno e temperaturas mais baixas tornam-se um grande atrativo para o turismo e especulação imobiliária, visto que se diferencia em uma região semiárida, e na B3. Os

resultados mostraram que a dinâmica dos usos da terra pode ser influenciada pelas características ambientais, a qual a bacia pertence.

4 MODELO DE PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS PARA CONSERVAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS: ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA APOIO À DECISÃO.

4.1 Introdução

Dentre os bens de uso comum e universal, a água é um dos principais recursos dotados de insegurança e incerteza quanto a sua sustentabilidade, isso se deve à crescente demanda por água para as atividades humanas e alterações do regime hidrológico. Os fatores humanos, que incluem o aumento da demanda para o uso doméstico, industrial e na agricultura, foram projetados como os principais responsáveis pela escassez da água em escala global no futuro, e esse risco será intensificado pelas mudanças climáticas (IPCC, 2022), o que torna um desafio eminente para as políticas de gestão e gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente em regiões semiáridas.

Na região semiárida brasileira, a pluviometria é altamente variável e não chove na maior parte do ano. Segundo De Araújo *et al.* (2023), o Estado do Ceará tem um déficit hídrico crítico, com precipitação média anual de 800 mm e uma evapotranspiração potencial anual maior que 2000 mm, sofrendo com escassez hídrica devido aos seus rios intermitentes e longas secas.

A redução da oferta da água numa bacia hidrográfica está diretamente relacionada à degradação dos ecossistemas naturais, com o desmatamento das florestas naturais, e ao manejo inadequado do solo (Honda; Durigan, 2017).

O uso do solo exerce forte influência nos processos de conservação da água, tanto em quantidade como em qualidade numa bacia hidrográfica (Chaves *et al.*, 2019). A supressão da vegetação e sua substituição por outros tipos de cobertura, podem acarretar o assoreamento dos reservatórios que além de diminuir a capacidade de armazenamento, acarreta redução da produção de água, sendo uma desvantagem para regiões semiáridas do Estado do Ceará (De Araújo *et al.*, 2023)

Dentre os objetivos para o desenvolvimento sustentável, destaca-se o objetivo 6 que visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todas as pessoas (IPEA, 2019), tendo como metas enfrentar a escassez de água e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água, garantindo assim a segurança hídrica (Abreu; Mesquita; Bermudez, 2021).

O homem pode exercer influência positiva na oferta dos serviços ambientais adotando práticas de manejo sustentáveis, o que faz crescer os mecanismos de incentivo por essas ações (Gjorup *et al.*, 2016). A Agência Nacional de Água – ANA desenvolveu, em 2008, o Programa Produtor de Água (PPA) e, de acordo com seu manual operativo (ANA, 2012), o programa é um instrumento pelo qual a União apoia a melhoria, a recuperação e a proteção de recursos hídricos em bacias hidrográficas. O Programa também é uma ferramenta de articulação entre a Agência, os usuários e o setor rural, usando o conceito de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que estimula os produtores a recuperarem suas nascentes e recursos hídricos, mediante apoio técnico e financeiro (ANA, 2018).

A caracterização do meio físico das bacias hidrográficas, em especial as áreas de recarga das nascentes, é condição básica para o sucesso do planejamento da conservação e produção de água (Correia; Oliveira; Araújo, 2020). Compreender a vulnerabilidade dos recursos hídricos é importante para a sua proteção, gestão eficaz e desenvolvimento sustentável de sua bacia hidrográfica. Projetos e programas de ações que visem a conservação dos recursos hídricos são financeiramente onerosos, havendo a necessidade de destinação precisa dos recursos visando alcançar a maximização dos benefícios ambientais (Cartolano *et al.*, 2022). Neste sentido, a integração de ferramentas de SIG e metodologias baseadas em análise multicritério, serão determinantes no alcance de resultados mais efetivos.

A contínua evolução dos recursos de geotecnologia e a facilidade do seu acesso, têm permitido o desenvolvimento de múltiplos sistemas de identificação e definição de áreas de risco e no seu mapeamento (Mantis; Vaz, 2019). Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliados a outras técnicas de geoprocessamento, são indispensáveis para o mapeamento e identificação das áreas com risco. Essas ferramentas permitem a manipulação de grande quantidade de dados e informações georreferenciados, bem como a representação cartográfica dos mesmos, possibilitam a tomada de decisão, como também uma economia de recursos e tempo, conforme descrevem Zanata *et al.* (2012).

A necessidade de tomada de decisão por parte dos gestores de órgãos ambientais é diária e complexa. Quando se fala em processo decisório é fundamental que a decisão esteja baseada em informação e não somente na intuição ou experiências individuais (Falsarella; Silva; Mariosa, 2022). Analisar os diferentes planos de informação que caracterizam uma paisagem, percorre os preceitos da tomada de decisão multicritérios como estratégia de planejamento ambiental (Valente; Petean; Vettorazzi, 2017). No contexto de estudos

ambientais, a análise multicritério permite integrar e manipular informações espaciais para observar determinados comportamentos e respostas no espaço de interesse (Martins, 2009).

A análise multicritério consiste em um conjunto de métodos que podem ser empregados para auxiliar tomadas de decisão, individual ou em grupo, que devem ser embasadas em múltiplos critérios (Cinelli; Coles; Kirwan, 2014). A necessidade de tomar decisões existe em diferentes áreas da ciência e sociedade e, no âmbito dos recursos hídricos, esse tipo de análise foi observada nas áreas de: Gestão de bacias hidrográficas; Gestão da água subterrânea; Infraestrutura e seleção; Avaliação de projetos; Alocação de água; Política e planejamento da oferta de água; Qualidade da água; Gestão da qualidade; e Gestão de áreas marinhas (Hajkowicz; Collins, 2007; Tedesco; Oliveira; Trojan, 2021).

A Análise Hierárquica de Processos (AHP), desenvolvido por Thomas Saaty, é um método que avalia múltiplas alternativas por ordem de prioridade, e tem como objetivo o apoio à tomada de decisão (Coffey; Claudio, 2021; Saaty, 1994; Souza; Corso, 2020), podendo ser utilizados critérios qualitativos e quantitativos, tendo como foco a análise do julgamento estabelecido pelo especialista ou decisor (Carvalho, 2020).

A identificação de áreas prioritárias significa uma decisão entre as alternativas encontradas, levando em consideração critérios, que servirão como uma base mensurável e avaliável para uma tomada de decisão (Adem Esmail; Geneletti, 2018). Assim, para ações de conservação de bacias hidrográficas é necessária uma análise preliminar das áreas, considerando, aspectos físicos, sociais, culturais e econômicos, visando sempre a melhor estratégia de escolha.

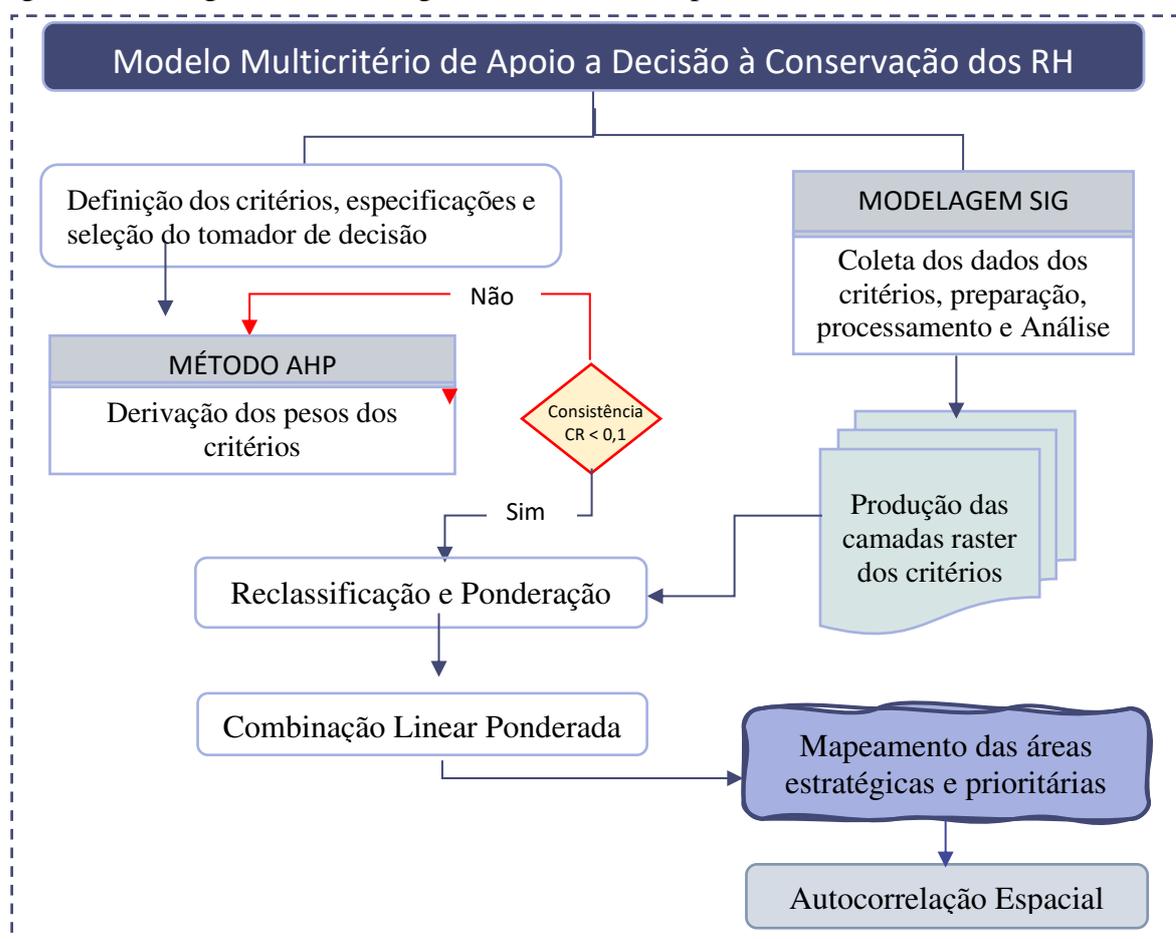
Em face do exposto, o objetivo é propor um modelo para mapeamento de áreas estratégicas e prioritárias para conservação, a partir da análise multicritério para apoio à decisão, como subsídio à gestão de três bacias hidrográficas baseado em suas características geoambientais e seu histórico de ocupação. Essas áreas prioritárias podem vir a ser contempladas com programas ou projetos de compensação em bacias, contribuindo para a regulação da disponibilidade hídrica e manutenção da sua qualidade. Esse tipo de trabalho pode ser essencial na hora de escolher e estruturar as áreas de conservação. As ferramentas necessárias para alcançar o sucesso destas áreas terão de ter em conta os fatores ecológicos, sociais e econômicos que o modelo proposto contempla.

4.2 Material e Métodos

O método é baseado na contextualização e estruturação de um problema, seguido de análise em ambiente SIG e formulação da decisão mais adequada à realidade da área em estudo (Adem Esmail; Geneletti, 2018). Os modelos que utilizam operações de sobreposição ponderadas oferecem um mapeamento mais flexível em comparação com as operações baseadas em lógica booleana, que se limitam a duas condições distintas.

Neste estudo, o modelo AHP foi utilizado para estruturação do problema, permitindo determinar os pesos e classificações dos critérios, consentindo uma solução priorizada. Em seguida, utilizando o poder analítico e de integração do SIG, foi possível avaliar e mapear as áreas prioritárias à conservação dos recursos hídricos nas áreas de estudo. O processo de estudo está representado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma Metodológico do Modelo de Apoio à Decisão.



Fonte: Autora.

4.2.1 Definição dos Critérios e Subcritérios

Os critérios são as características de interesse na análise da paisagem, que auxiliam como indicadores na definição dos locais prioritários (Cartolano *et al.*, 2022). A qualidade dos recursos hídricos é determinada por uma variedade de fatores naturais e de influência antrópica, devendo ser analisada de maneira interdisciplinar.

Buscando uma análise holística e na identificação de áreas prioritárias à conservação dos Recursos Hídricos, associado ao uso de dados cartográficos locais que estivessem disponíveis em bases públicas, ou que pudessem ser confeccionadas por meio de técnicas de sensoriamento remoto, e sua fácil aplicabilidade por gestores ambientais, foram considerada nessa proposta cinco critérios: uso e cobertura da terra, proximidade dos rios, proximidade das nascentes, fontes de recarga dos aquíferos e declividade (Figuras 10, 11 e 12). A seleção dos critérios levou em consideração a fundamentação de outros estudos (De Almeida *et al.*, 2020; Barbosa; Neto; Silva, 2021; Cartolano *et al.*, 2022; Ferreira; Silva, 2020; Ghosh; Maiti, 2021; Gjorup *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2021; Tedesco; Oliveira; Trojan, 2021).

Para o critério de uso e cobertura da terra foi utilizada a imagem Landsat 8, datada de junho de 2022, onde os referidos processos de classificação de imagem e verificação da acurácia estão descritos no item 5.2 (Quadro 3). As classes identificadas foram: água, área florestal, área antropizada e área de agricultura. As maiores prioridades foram atribuídas às classes que apresentaram a ausência de cobertura vegetal.

Um dos fatores importantes à conservação dos recursos hídricos é a proximidade à rede de drenagem. A cobertura vegetal é um fator importante à geração de água de qualidade em uma bacia hidrográfica, independentemente da sua distância ao corpo hídrico (Vettorazzi; Valente, 2016). No entanto, essa importância cresce à medida que a distância para o corpo d'água, ou nascente, diminui, visto a grande relevância das matas ciliares (De Almeida *et al.*, 2020).

Para a obtenção do critério proximidade dos rios, foram calculadas distância euclidiana nas faixas de 0 a 30, 30 a 250, e superior a 250 metros em relação à rede de drenagem. A faixa até 30 m corresponde a Área de Preservação Permanente conforme Lei n.º 12.651/2012, sendo maior sua prioridade à conservação.

As nascentes correspondem ao local de afloramento natural das águas subsuperficiais, de forma perene ou intermitente, quando o nível freático atinge a superfície, dando início a um curso d'água (Correia; Oliveira; Araújo, 2020; Silva; Moura Fé; Costa, 2023). As nascentes representam uma fonte importante de água para a população que mora na zona rural, devendo ser protegidas. A base do critério Proximidade das Nascentes foi gerado com distância euclidiana dos pontos de nascentes, considerando a faixa de 0- 50 metros a maior prioridade, embasada na legislação brasileira referente às áreas de APP de nascentes (Brasil, 2012). As demais faixas, com ordem decrescente de prioridades, foram de 50 a 250 m, e superior a 250 metros das nascentes.

As fraturas nas rochas e a porosidade das formações geológicas permitem a infiltração e transporte subterrâneo da água, sendo consideradas áreas potenciais de recarga de aquíferos, conseqüentemente produtoras de água (Moura, 2014). Para a determinação do critério de proximidade das fontes de recarga dos aquíferos foi realizada uma combinação de bases geológicas da CPRM (2017), com informações espaciais das fraturas e litologia dos aquíferos nas bacias em estudo. Os aquíferos identificados foram classificados como: aquífero fissural, aquífero barreiras, aquífero dunas, e aquífero de depósitos colúvio-eluviais. Foi considerada uma área de amortecimento de 50 metros das fraturas, levando em consideração o raio mínimo adotado de proteção para as nascentes.

A declividade é considerada um fator de grande influência nos deslizamentos e erosão do solo. Quanto maior a inclinação do terreno, maior é a importância de recuperar a área, uma vez que esta estará mais propícia à erosão, aumentando a produção de sedimentos que prejudicam a qualidade e quantidade de água (Mantis; Vaz, 2019). A declividade foi gerada em software SIG, com a função *slope*, utilizando as imagens do modelo digital de elevação do sensor NASADEM, lançado em 2020, com resolução espacial de 30 metros, obtidos no site da NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), e classificada de acordo com (Ross, 1994).

Para a modelagem em ambiente SIG, foram utilizados dados vetoriais e raster de fontes variáveis e com escalas diferentes. Visando a normalização e adequação das escalas das camadas para processamento posterior, os dados vetoriais dos critérios, foram convertidos para o formato raster com resolução espacial de 15 metros, e depois reclassificados conforme os pesos atribuídos à cada subcritério para posterior aplicação do método AHP. Todas as bases foram convertidas para o sistema de referência SIRGAS 2000, com projeção em Universal Transversa de Mercator – UTM, Zona 24 Sul.

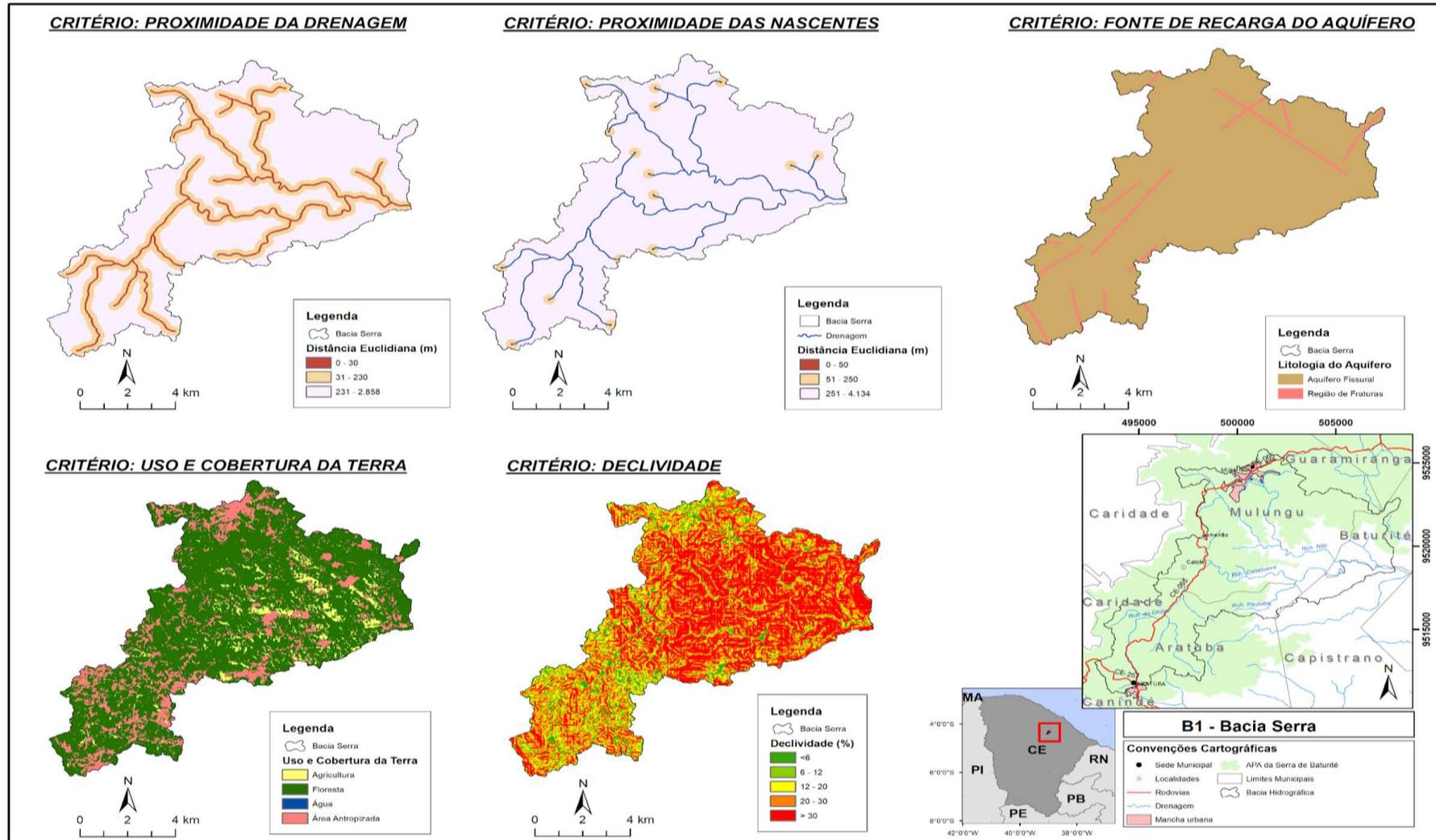
O Quadro 3, traz a síntese dos critérios, a base de dados e as ferramentas utilizadas para a modelagem.

Quadro 3 - Ferramentas utilizadas para extração de dados de cada critério com as áreas prioritárias à conservação

Crítérios	Fonte dos dados	Ferramenta de extração
Uso e Cobertura da Terra	Imagem Landsat 8 (27 de Junho 2022), 15m, United States Geological Survey (USGS), https://earthexplorer.usgs.gov	Classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança em estrutura raster.
Proximidade da drenagem	Dados vetoriais na escala 1:100.000, Fonte: COGERH (2015)	Cálculo da distância euclidiana e conversão para estrutura raster.
Proximidade das Nascentes	Dados vetoriais na escala 1:100.000, Fonte: COGERH (2015)	Cálculo da Distância Euclidiana e conversão para estrutura raster.
Fonte de recarga de aquíferos	Dados Vetoriais das Fraturas e litologia na escala 1:500.000, Fonte: CPRM (2017). https://geosgb.cprm.gov.br/	Recorte da litologia das bacias em estudo e união com buffer gerado de 50 m das fraturas. A base vetorial foi convertida para raster.
Declividade	MDE Nasadem, 30m, NASA https://search.earthdata.nasa.gov/search	Execução da função <i>slope</i> do QGIS.

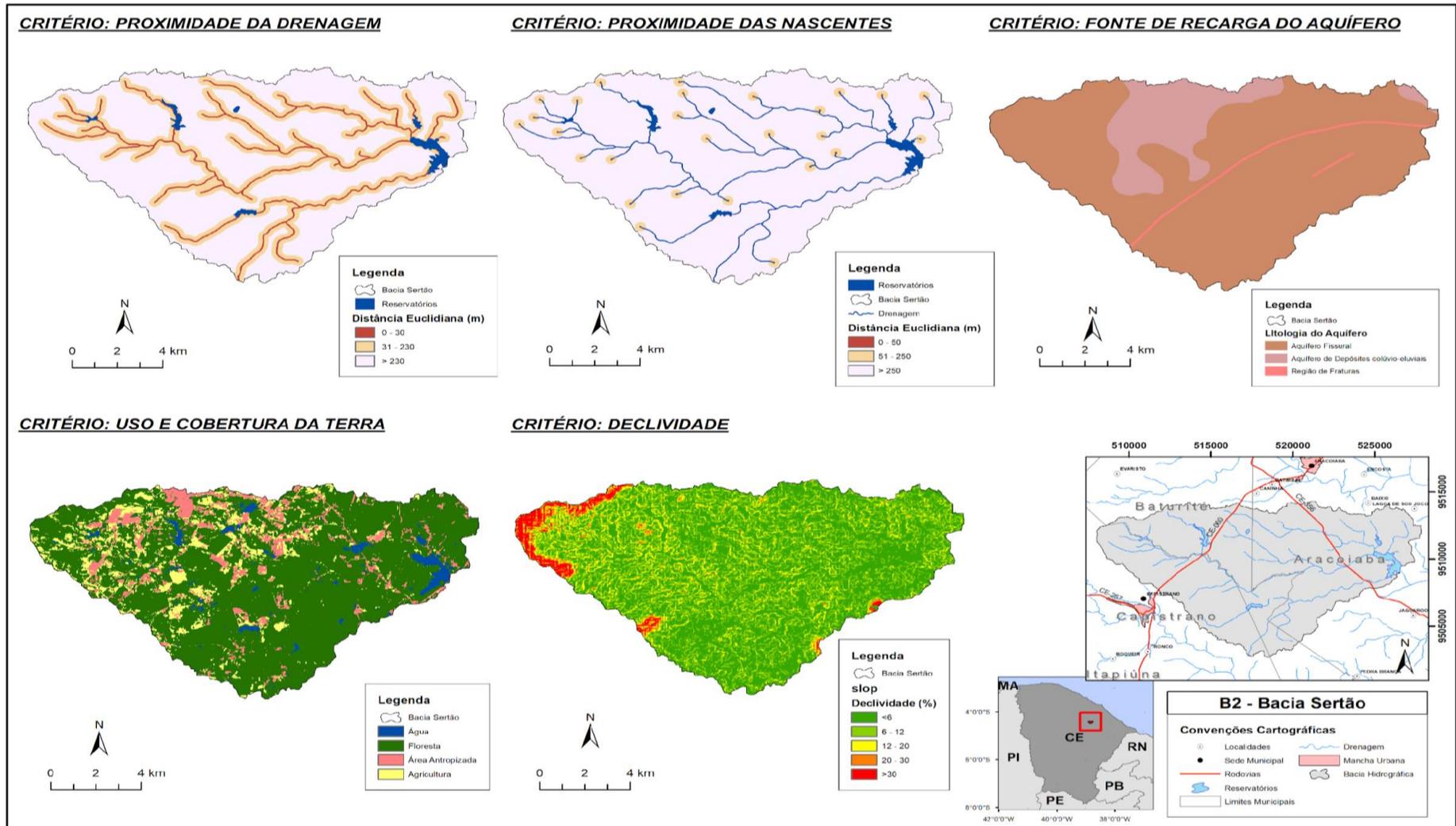
Fonte: Autora.

Figura 10 - Critérios Bacia Serra - B1



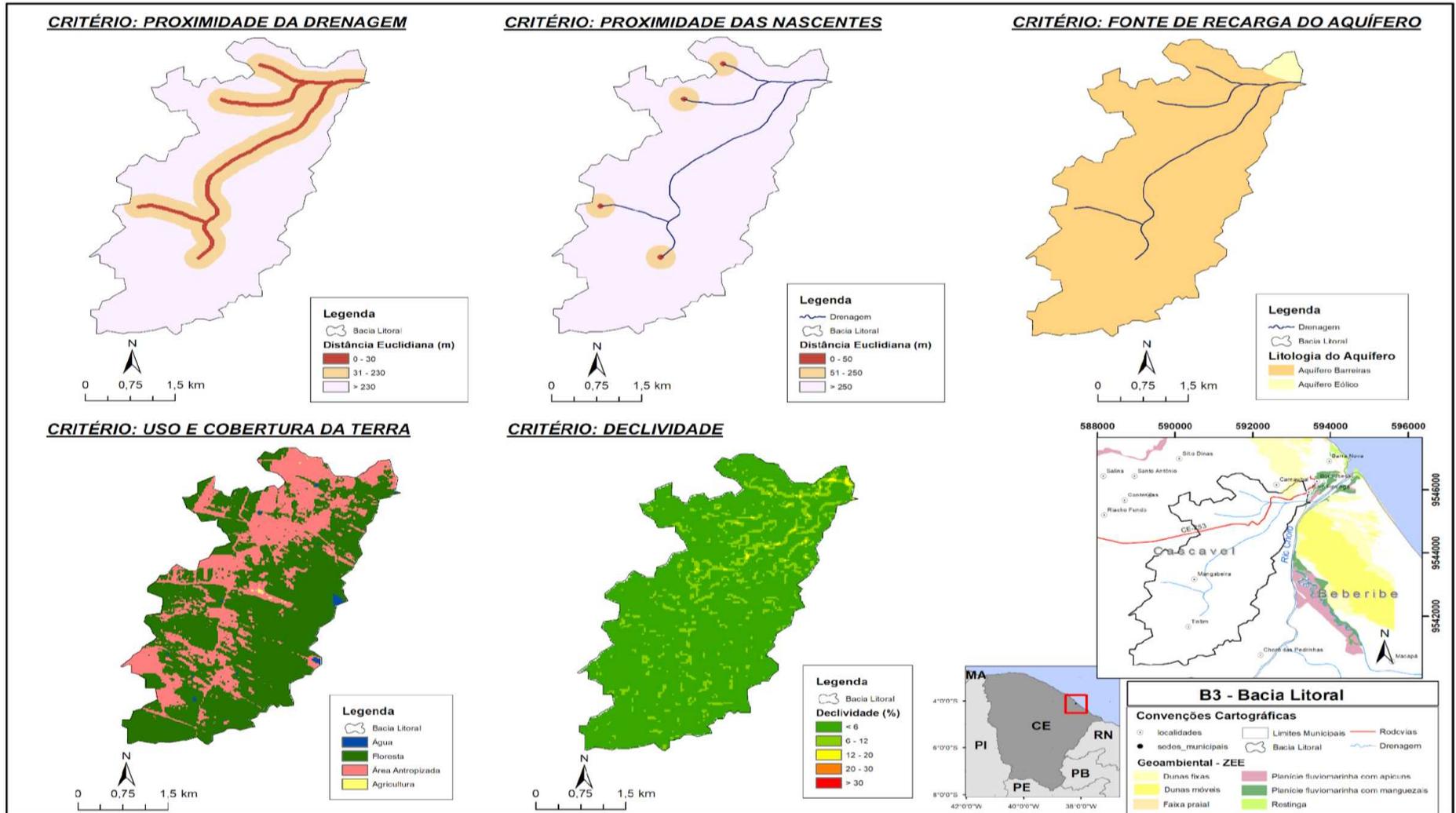
Fonte: Autora.

Figura 11 - Critérios Bacia Sertão - B2



Fonte: Autora.

Figura 12 - Critérios Bacia Litoral - B3



Fonte: Autora.

4.2.2 Determinação do Peso dos Critérios

Os critérios desenvolvem pesos relativos, chamados prioridades, para diferenciar a importância de cada um (Saaty, 1991). Os pesos dos critérios foram definidos por meio da matriz de comparação pareada, realizada por seis especialistas, onde a relação de importância entre cada par de fatores foi quantificada, empregando-se a escala fundamental estabelecida por Saaty (Quadro 1).

O grupo dos decisores foi formado por professores universitários, pesquisadores e gestores ambientais de órgãos públicos, que trabalham nas áreas relacionadas com o objetivo do estudo. Foi enviado por e-mail um resumo preliminar do projeto aos especialistas, que incluía os objetivos do modelo proposto e uma tabela para preenchimento (Apêndice A). No formulário, os decisores forneceram o peso atribuído a cada critério quando comparado com outro, em uma escala de 1 a 9, com base na importância dele para os propósitos do estudo.

A partir da matriz gerada é necessário julgar a eficiência do modelo com base na sua consistência. O índice de consistência (IC) e a taxa de consistência (TC) são usados para verificar se os respondentes responderam consistentemente a perguntas de comparação pareada (Ghosh; Maiti, 2021; Hu *et al.*, 2021; Saaty, 1991). A taxa de consistência deve ser menor que 10%, indicando consistência nos valores da matriz e não havendo necessidade de reavaliar as comparações (Saaty, 1994). O IC e TC podem ser obtidos pelas Equações (1) e (2).

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$TC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Onde, $\lambda_{m\acute{a}x}$ é Autovalor Máximo da matriz, n é número de critérios, RI é o índice randômico. O índice randômico também foi proposto por Saaty (1991) e varia de acordo com o número de fatores analisados (Tabela 4).

O Autovalor máximo da matriz ($\lambda_{m\acute{a}x}$), é obtido pela multiplicação da matriz de julgamentos pelo vetor coluna de prioridades computado (pesos) seguido da divisão desse novo vetor encontrado (Aw), pelo primeiro vetor w (3).

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Aw_i}{w_i} \quad (3)$$

Onde:

λ máx: Autovalor máximo.

n: Número de critérios.

Aw: Matriz resultante do produto da matriz de julgamento pelos pesos calculados (autovetor).

w_i : Peso do critério.

Tabela 4 - Valores de Índices Randômicos.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,00	0,52	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1991)

Toda a parte de cálculo do método AHP foi feita com o auxílio do AHP Excel Template (<https://www.scbuk.com/ahp.html>).

4.2.3 Avaliação das Áreas Prioritárias

Após classificação e definição dos pesos dos parâmetros, o mapeamento das Áreas Prioritárias à Conservação em Bacias Hidrográficas - APC, foi gerado com a sobreposição de camadas utilizando a Combinação Linear Ponderada. Considerado um método prático e eficiente, este é um dos procedimentos mais amplamente utilizados na análise multicritério (De Almeida *et al.*, 2020), principalmente por fazer a compensação dos pesos dos critérios. A Equação (4) foi utilizada para o cálculo do APC.

$$APC = \sum_{i=1}^5 w_i \cdot x_i \quad (4)$$

Onde, w_i é o peso do critério e o x_i é a área correspondente ao critério. A função utilizada para esse processo foi a calculadora raster do QGIS.

4.2.4 Autocorrelação Espacial

A autocorrelação espacial é utilizada para verificar se o atributo de uma região é afetado pelo mesmo parâmetro em localizações espaciais adjacentes. Neste estudo foi aplicado

o índice de Moran, coeficiente amplamente utilizado, dividido em Índice de Moran Global e Índice de Moran Local (LISA) (Hu *et al.*, 2021; Lee; Li, 2017; Luzardo; Castanêda Filho; Rubim, 2017; Saleh *et al.*, 2023). O Índice de Moran Global (I), mede o grau de associação espacial entre o conjunto de dados, indicando se as feições analisadas possuem padrão de agrupamento, se são dispersas ou simplesmente distribuídas aleatoriamente, sendo expresso pela Equação (5).

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \mu)(x_j - \mu)}{(\sum_i \sum_j w_{ij} \sum_i (x_i - \mu)^2)} \quad (5)$$

Onde, N é o número de áreas, x é o valor do atributo considerado na área; μ é o valor médio do atributo na região de estudo; w_{ij} é o elemento [ij] da matriz de vizinhança normalizada. O I de Moran é igual a +1 (agregação) e -1 (dispersão) no caso de autocorrelação espacial positiva e negativa, respectivamente. No entanto, zero indica a falta de autocorrelação espacial.

Lisa reflete a correlação local da distribuição espacial dos atributos, sendo necessária sua execução, pois agrupamentos locais podem ser formados mesmo que o Índice de Moran Global indique aleatoriedade espacial (Yao *et al.*, 2022). A fórmula é expressa por Equação (6).

$$I_l = \frac{x_i - \mu}{\sum_i (x_i - \mu)^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \mu) \quad (6)$$

O mapa gerado indica as áreas com agrupamentos (AA e BB) e de transição (AB e BA), atípicos ou não (Luzardo; Castanêda Filho; Rubim, 2017). O *cluster* Alto-Alto (AA), indica que os valores altos são cercados por valores altos; Baixo – baixo (BB), valores baixos são cercados por valores baixos; (AB) área de transição, com valores altos cercados por valores baixos; (BA) área de transição, com valores baixos cercados de valores altos; e, não significativo indica que o valor está próximo de uma distribuição aleatória.

A análise geoestatística foi realizada utilizando o software gratuito GEODA (*Spatial Statistical Program*).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Influência dos Subcritérios no Modelo APC-AHP

Os critérios são os diferentes fatores que influenciam a decisão e os subcritérios são as diferentes dimensões de cada critério. Para eliminar a influência de diferentes dimensões, os subcritérios foram pontuados em uma escala de cinco partes iguais, com notas de 2, 4, 6, 8 e 10 nas bacias B1, B2 e B3 (Figuras 14, 15 e 16). Os subcritérios com baixa influência na prioridade para ações de conservação dos recursos hídricos receberam uma menor pontuação comparado aos que representam alta prioridade. Ou seja, áreas urbanizadas com maiores declives, mais próximos à rede de drenagem e das nascentes e em estrutura geológica mais porosa, ficaram com valores mais próximos a 10, indicando maior prioridade para ações de proteção. Restrições são lugares onde existem certas limitações espaciais na perspectiva de conservação de áreas, que nesse estudo, foi considerada a classe Água do critério de uso e cobertura da terra. A Tabela 5 mostra as notas atribuídas de acordo com as características quantitativas ou qualitativas de cada subcritério com base na literatura.

Tabela 5 – A natureza e hierarquia do modelo APC-AHP.

Critérios	Subcritérios	Nota
Uso e Cobertura da Terra	Água	Restrição
	Floresta	2
	Área Antropizada	10
	Área de Agricultura	6
Proximidade da rede de drenagem	< 30m	10
	30 - 230	4
	> 230 m	2
Proximidade das nascentes	< 50 m	10
	50 - 250	4
	> 250 m	2
Fontes de Recarga de Aquíferos	Aquífero Fissural (Rochas Ígneas e metamórficas)	2
	Aquífero Barreiras (Arenitos, argilitos e siltitos)	6
	Aquífero Dunas (Areias eólicas)	10
	Aquífero Depósitos Colúvio-Eluviais	6
	Região de fratura /falhas (buffer de 50m)	10
Declividade	< 6%	2
	6 – 12	4
	12 – 20	6
	20 – 30	8
	> 30%	10

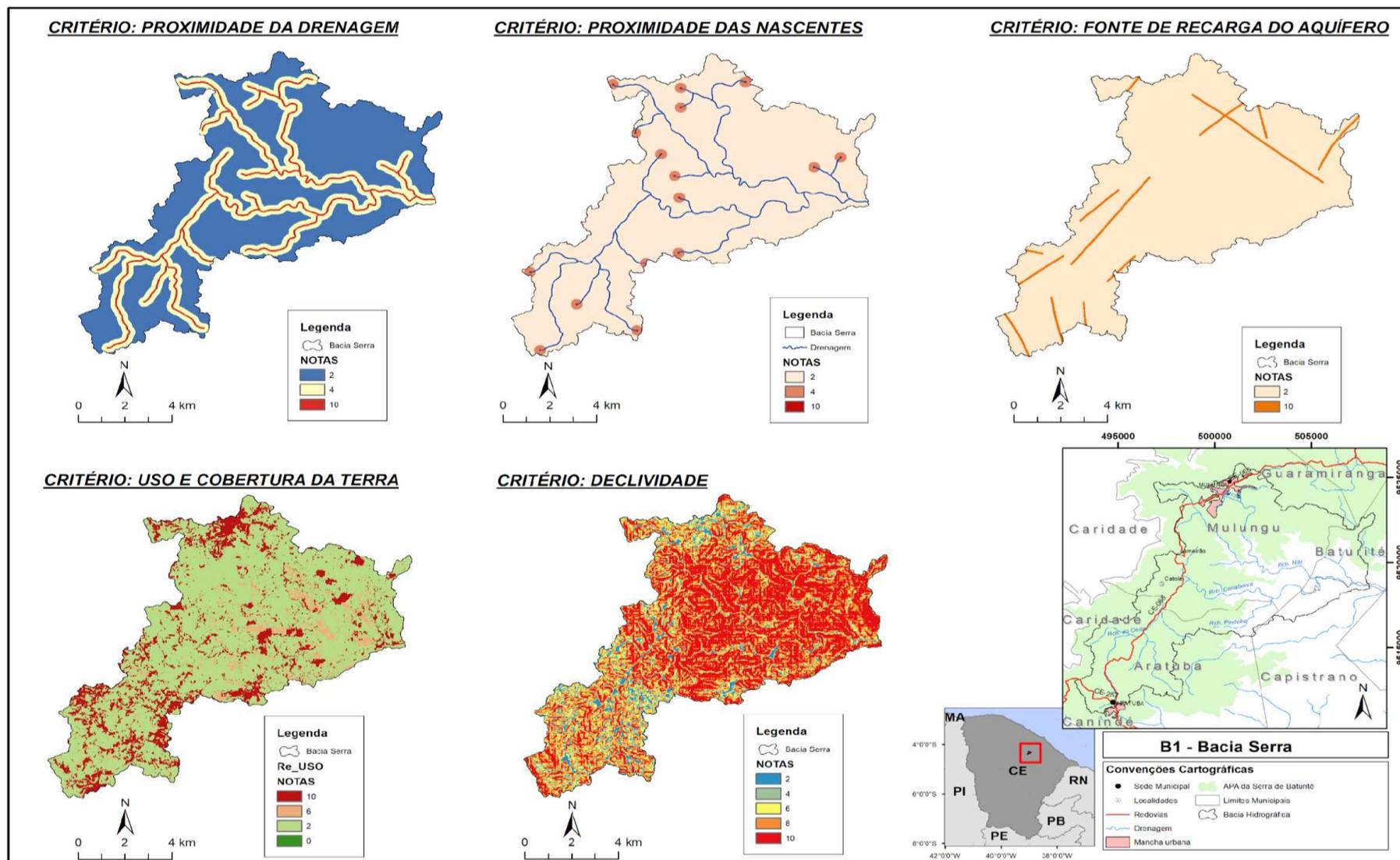
Fonte: Autora.

Na B1 (Figura 13), 18,11% da área recebeu nota 10, referente às áreas urbanizadas, e 5,31% receberam nota 6, classe da agricultura. Cerca de 5,29% da bacia, são áreas situadas até 30m da rede de drenagem, sendo áreas mais prioritárias. Estão numa distância de 30 a 230 m, os 2755,4 ha de área, recebendo nota 4. Em relação ao critério das nascentes, cerca de 12,98 ha estão localizadas no raio de 30 m. Toda a bacia da Serra pertence ao aquífero fissural. Os embasamentos cristalinos são considerados ambientes com baixo potencial hidrogeológico devido à sua porosidade (Feitosa, 2008). A recarga dessas regiões aquíferas ocorre por infiltração nas fraturas abertas e/ou por fissuras. Todavia, devido à presença de falhas/fraturas, 3,39% da área recebeu nota 10. Em relação à declividade, 44,46% da área recebeu nota 10 por estar situado em declividades superiores a 30% e 22,78% por ter declividade entre 20 e 30%, indicando risco forte e muito forte aos processos erosivos e de deslizamentos de terra.

Na B2 (Figura 14), 407,86 ha foi considerado como áreas restritas. Na bacia do Sertão, devido ao contexto histórico de ações de combate a seca, é o que apresenta maior área superficial referente aos reservatórios de abastecimento de água. As áreas urbanizadas, que receberam nota 10, correspondem a 9,24% da área, e agricultura, nota 6, ocupa 10,89% da bacia. A faixa de proteção de 30 m da rede de drenagem e de 50 m das nascentes, que recebem nota mais alta, correspondem a 744,48 ha e 22,78 ha, respectivamente. O relevo da bacia em sua maior porção é formado por áreas planas e suavemente onduladas (87,23%), atribuindo notas mais baixas quanto à susceptibilidade à erosão. Apenas 4,5% da área recebeu notas mais altas quanto a influência da declividade na conservação dos recursos hídricos. Quanto à fonte de recarga dos aquíferos, 83,65% da bacia faz parte do aquífero fissural, sendo 1,27% região de fraturas a serem protegidas. Os aquíferos coluvial-eluviais têm uma porosidade primária, onde a água flui mais facilmente entre os grãos (Feitosa, 2008). Por causa dessa porosidade, 16,36% da bacia recebeu nota 6 de prioridade.

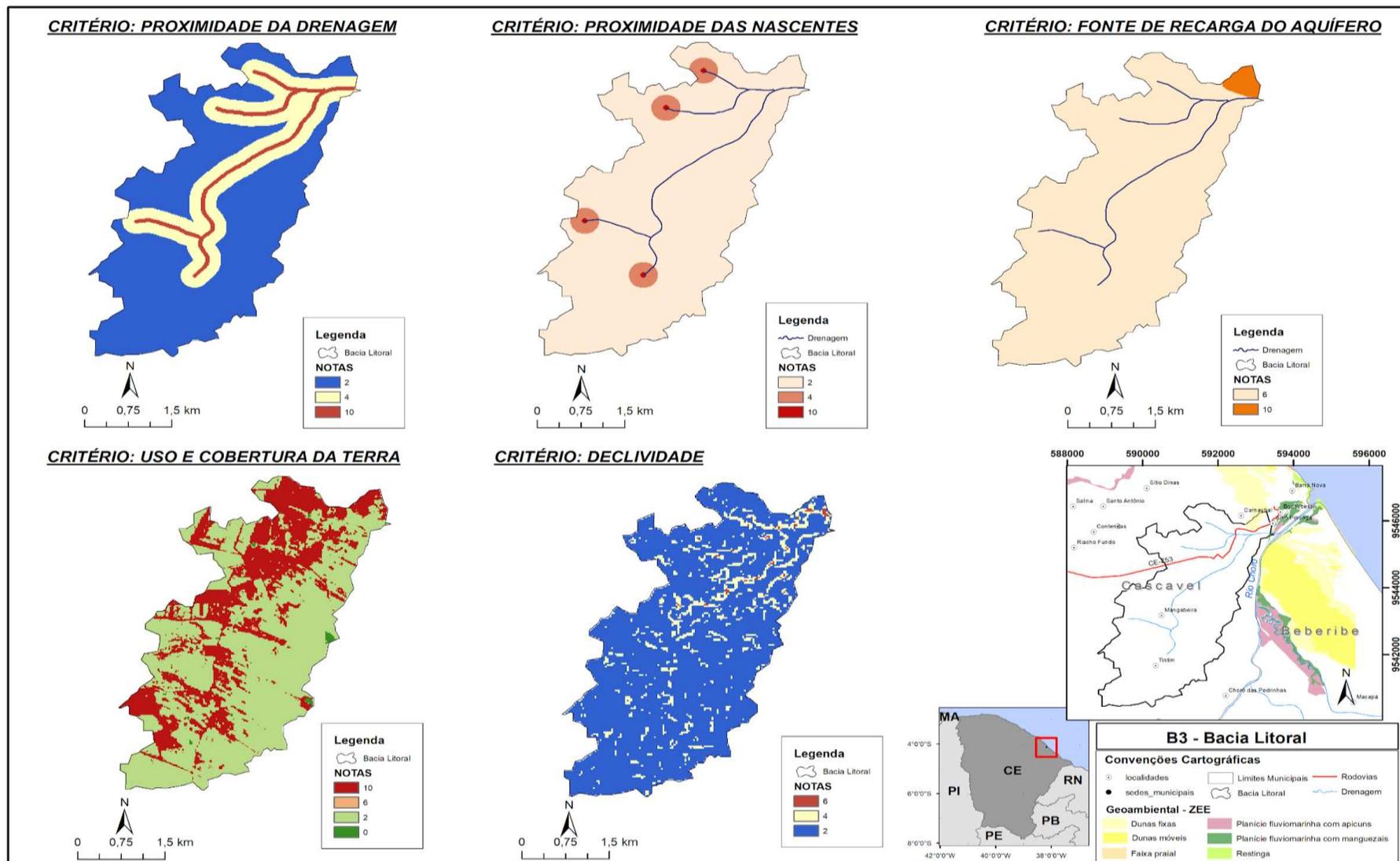
A B3 (Figura 15), bacia do litoral, apresentou 33,07% do seu território classificado como área urbanizada, refletindo a forte pressão sofrida em regiões litorâneas, passando a ter uma influência maior na preservação dos recursos hídricos. A bacia apresenta uma fraca rede de drenagem, quando comparada às outras bacias em estudo, apresentando 68,92 ha (4,58%) de área dentro da faixa de 30 m. Em relação à declividade, 99,58% da sua área é classificado como plano e levemente ondulado, demonstrando uma baixa influência da declividade nos processos erosivos nessa bacia. Na área foram identificados aquíferos Barreiras e Eólico, ocupando 98,26% e 1,74%, respectivamente. O aquífero barreiras é formado por rochas sedimentares pouco consolidadas, compostos por camadas arenosas a silto-arenosas, o que lhe confere um comportamento hidrodinâmico bastante variável (Gonçalves; Vieira, 2018).

Figura 13 - Notas dos Subcritérios da B1.



Fonte: Autora.

Figura 15 - Notas dos Subcritérios da B3.



Fonte: Autora.

4.3.2 Pesos dos Critérios do Modelo APC- AHP

Com o uso do AHP foi possível determinar os pesos dos critérios com base no julgamento dos decisores (Tabela 6). A fim de se levar em consideração todos os julgamentos simultaneamente, foi verificada a consistência dos julgamentos individuais e depois foi realizada a agregação dos julgamentos dos decisores, utilizando a média geométrica, obedecendo ao princípio de reciprocidade da Escala Fundamental de Saaty (Forman; Peniwati, 1998). O Índice de Consistência (IC) e a Taxa de Consistência (TC) foi de 0,01 e 0,01 respectivamente, indicando uma matriz coerente e confiável ($TC < 0,10$). O valor de λ máx foi de 5,05, confirmando a adequabilidade das ponderações realizadas, que deve ser λ máx ≥ 5 para o modelo proposto (Saaty, 1991).

A análise revelou que o critério que exerce maior influência na qualidade e quantidade dos recursos hídricos é o uso e cobertura da terra (0,43). Mudanças de uso e cobertura da terra alteram severamente a paisagem, diminuindo as áreas de floresta e a diversidade ecológica. A proximidade das nascentes exerce também um impacto significativo (0,23), seguido da proximidade dos rios (0,13). A fonte de recarga do aquífero foi o critério com o quarto maior peso (0,12) e a declividade foi o critério com menor peso (0,09).

Tabela 6 - Matriz Pareada com agrupamento dos julgamentos dos decisores para o modelo ACP-AHP.

	C1	C2	C3	C4	C5	PESO
C1	1,00	4,47	1,66	3,61	3,90	0,43
C2	0,22	1,00	0,55	1,32	1,44	0,13
C3	0,6	1,82	1,00	1,76	2,80	0,23
C4	0,28	0,76	0,57	1,00	1,44	0,12
C5	0,26	0,69	0,36	0,69	1,00	0,09
Σ	2,36	8,74	4,14	8,38	10,58	1

C1: Uso e cobertura da terra; **C2:** Proximidade dos rios; **C3:** Proximidade das Nascentes; **C4:** Fonte de Recarga dos Aquíferos; **C5:** Declividade. Fonte: Autora.

O fator humano, representado pelos critérios de ocupação e uso da terra, é de extrema importância pela interferência que gera na bacia hidrográfica e pelas consequências dessa ocupação, que exige o manejo adequado. Esse fator se torna mais acentuado quando estão próximas às áreas produtoras de água, a exemplo dos rios, nascentes e das fontes de recarga de água subterrânea, sendo mais sensíveis em terrenos com maior declividade. Esses resultados corroboram com os encontrados por (Ferreira; Silva, 2020), ao estudar a fragilidade ambiental

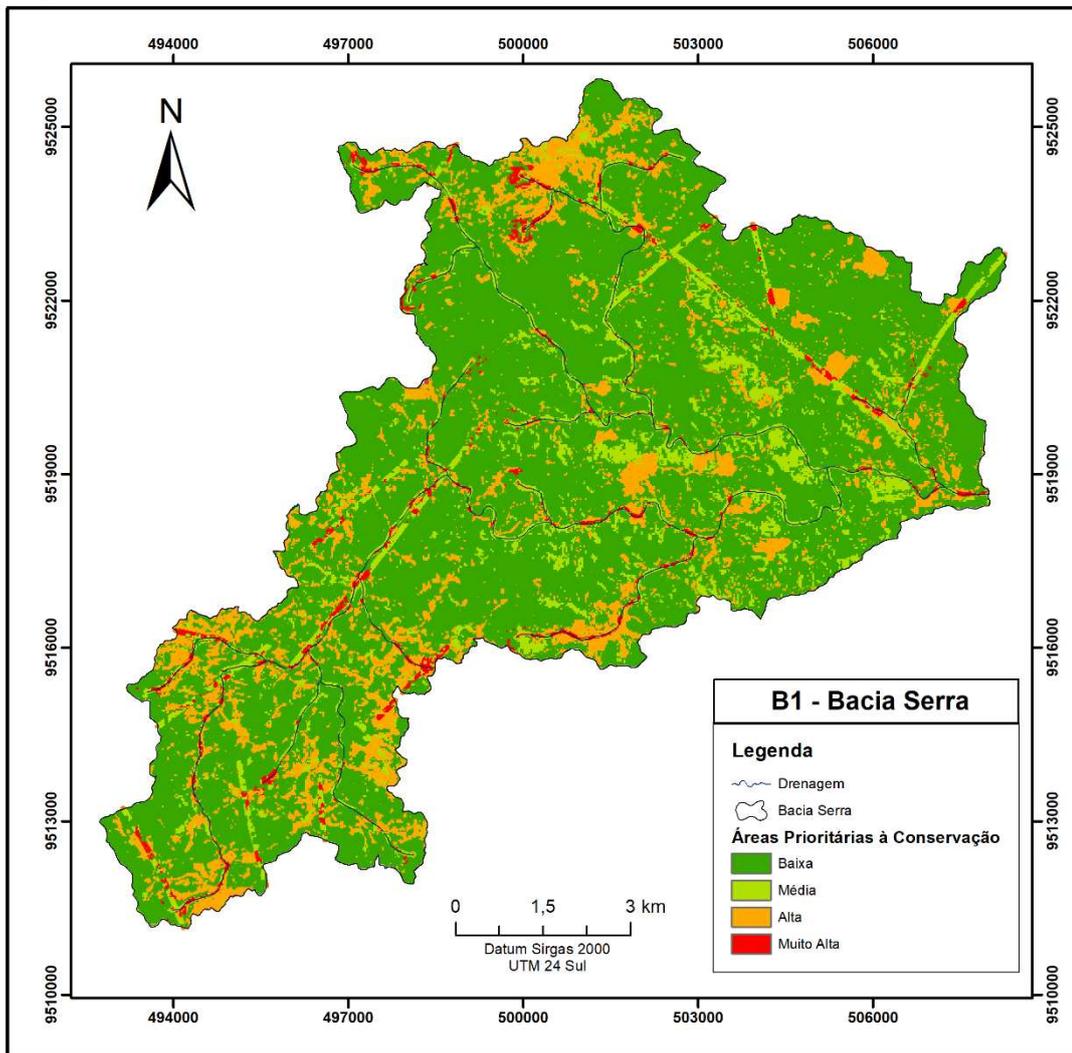
na bacia em Mato Grosso do Sul, tendo o critério uso e ocupação da terra como o primeiro do rank, e por de (Cartolano *et al.*, 2022), num estudo de priorização de áreas para restauração ecológica, onde o modelo mostrou as maiores prioridades para uso e ocupação do solo e áreas de APP dos rios e nascentes.

4.3.3 Áreas Prioritárias à Conservação nas Bacias Hidrográficas

As microbacias hidrográficas foram classificadas em quatro classes de priorização de áreas para ações de conservação: baixo (1-3), médio (3-5), alto (5-6) e muito alto (> 6). O mapa gerado do APC-AHP para a B1 (Figura 16), mostrou que 72,87% da área foi classificada como baixa prioridade, 9,91% como média, 15,11% prioridade alta e 2,12% muito alta. O mapeamento indica que a classe muito alta está, em maioria, situada nas Áreas de Preservação Permanente, tanto dos rios como das nascentes. Outros pontos evidenciados de prioridade muito alta, foram aqueles próximos às fraturas, principal fonte de recarga dos aquíferos no sistema cristalino. Segundo dados do Infosnba (2020), todo o abastecimento de água da população é feito pela captação da água subterrânea. Fica evidenciada a necessidade de proteção e recuperação dessas áreas produtoras de água para região e para a Bacia do rio Choró, já que faz parte de uma das cabeceiras principais dessa bacia. Isso reflete na manutenção dos processos ecológicos e hidrológicos essenciais para o equilíbrio da vida e do meio ambiente.

As áreas classificadas como de alta prioridade exercem pressão nos recursos hídricos na microbacia da Serra. Sua distribuição espacial está concentrada em áreas vizinhas e próximas às fontes hídricas. Nessas áreas foi possível observar em campo a retirada da vegetação natural para plantações de bananeiras, hortaliças e remoção total da vegetação para a urbanização. Vale ressaltar que a bacia se encontra dentro da Área de Proteção Ambiental da Serra de Baturité, Unidade de Conservação Estadual de Uso Sustentável (BRASIL, 2000), sendo permitido desenvolvimento de atividades econômicas desde que, licenciadas pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE. Do ano de 2012 a 2022, foram lavrados 283 autos de infração na APA de Baturité, sendo 47 dentro da bacia em estudo. As principais infrações foram desmatamento, construção de edificações e venda de recursos naturais sem a prévia licença do órgão ambiental (Ceará, 2022). Ao verificar as localizações de cada infração, estas sobrepuseram as áreas classificadas com alta e muita alta prioridade geradas pelo modelo APC-AHP.

Figura 16 - Áreas Prioritárias à Conservação na B1.



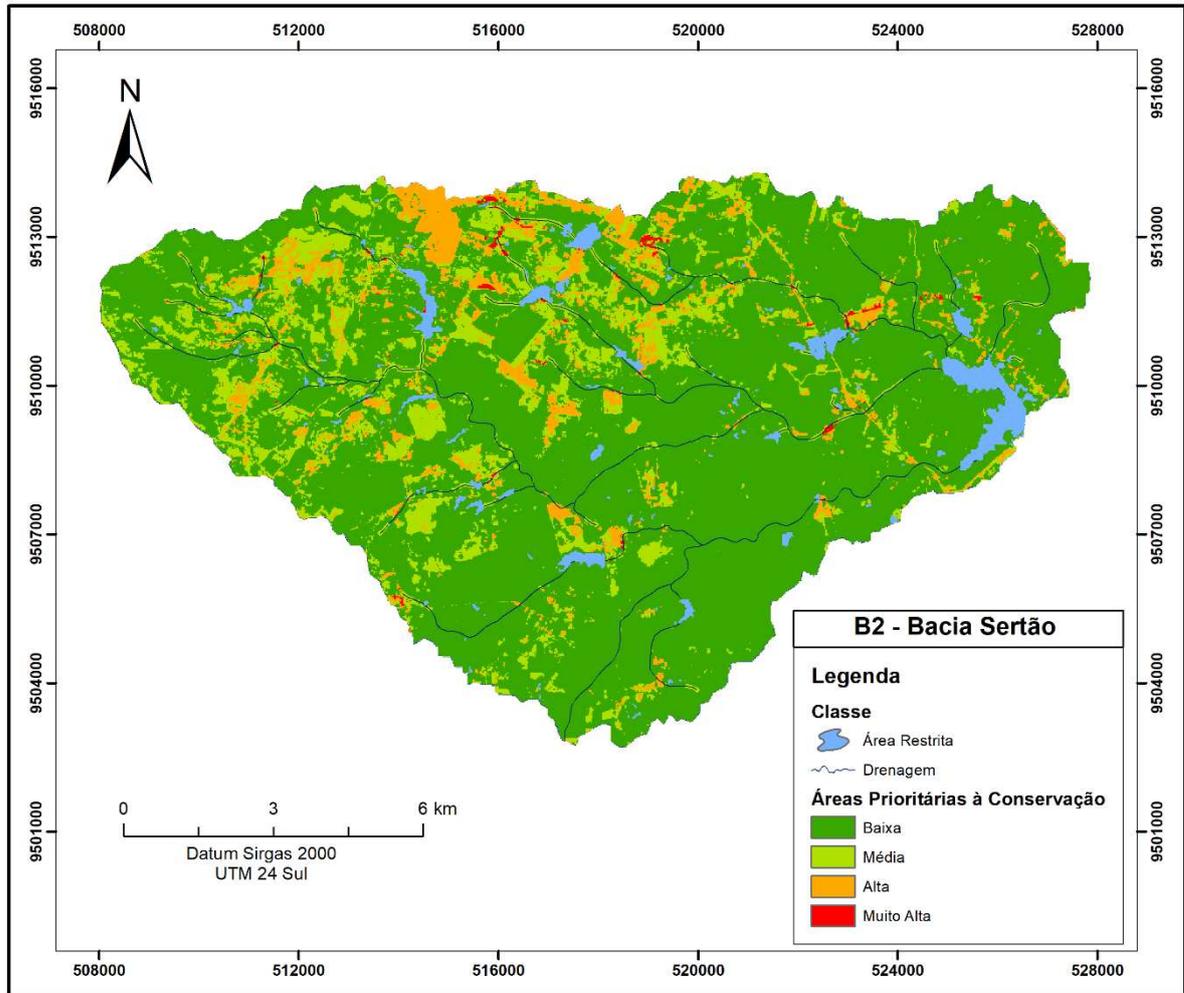
Fonte: Autora.

Na bacia do Sertão - B2 (Figura 17), o modelo APC-AHP mostrou que 937,8 ha correspondem às áreas com restrição de conservação que são os reservatórios. Das áreas que foram realmente avaliadas, o percentual correspondente a baixa prioridade foi de 78,40% do total. O grupo formado pela média prioridade à conservação foi de 14,41%, e alta prioridade com 6,85%. Essa bacia apresenta os maiores percentuais de APP preservados, o que justifica um percentual mais baixo de 0,34% de prioridade muito alta. O mapeamento indicou que essa classe ocorreu em áreas de nascentes, nas regiões de fraturas e às margens dos reservatórios.

As áreas classificadas como média e alta prioridade nesta bacia, estão mais concentradas na porção oeste da bacia, que pertence aos municípios de Baturité e Capistrano. Marcadas por extensas áreas destinadas à agricultura. Vale destacar que esta bacia é a única, dentre as estudadas, que possui reservatórios de água superficiais. O modelo sinalizou que as

áreas de contribuição desses reservatórios, já apresentam, em sua maioria, valores médios, altos e muito altos para ações de conservação. O que pode vir a refletir no processo de assoreamento e eutrofização dos corpos d'água, além de ser um incremento no processo de desertificação.

Figura 17 - Áreas Prioritárias à Conservação na B2.

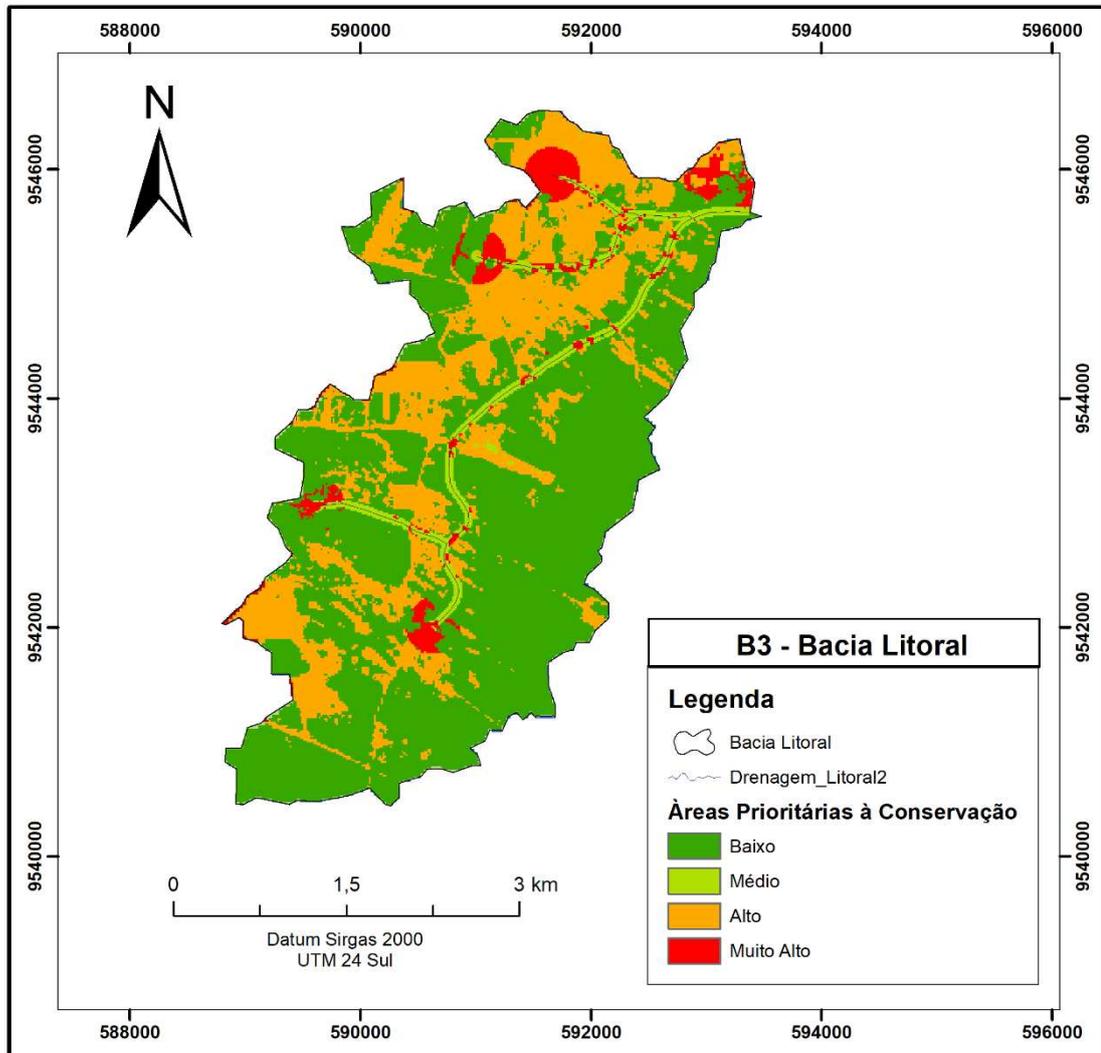


Fonte: Autora.

O modelo ACP-AHP na B3 (Figura 18), indicou que 62,89% da bacia do litoral possui baixa prioridade, apresentando prioridade média em 3,82% da área, com 29,38% sinalizando alta prioridade e 3,91% com níveis muito alto de prioridade às ações de proteção. O mapeamento está representado na Figura 18, e os resultados chamam atenção pelo fato de que 1/3 da bacia do litoral se encontra na faixa de alta a muito alta para ações de conservação. Esses dados corroboram com os impactos da expansão urbana no litoral do estado do Ceará que inclui desde o aumento do consumo e poluição das águas subterrâneas, construção em praias e dunas, aumento da produção de sedimentos pelo desmatamento na bacia afluente aos estuário,

desmatamento da vegetação nativa de dunas fixas e tabuleiros, impermeabilização dos solos, dentre outros (Meireles *et al.*, 2020; Soares *et al.*, 2021)

Figura 18 - Áreas Prioritárias à Conservação na B3



Fonte: Autora.

Tabela 7 - Percentual de área por prioridade na B1, B2 e B3.

	B1		B2		B3	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
BAIXO	7177,50	72,87%	10734,80	78,40%	929,34	62,89%
MÉDIO	976,03	9,91%	1972,87	14,41%	56,45	3,82%
ALTO	1488,26	15,11%	937,80	6,85%	434,14	29,38%
MUITO ALTO	208,53	2,12%	46,76	0,34%	57,83	3,91%
TOTAL	9850,32	100%	13692,22	100%	1477,76	100,00%

Fonte: Autora.

4.3.4 *Análise de Autocorrelação Espacial*

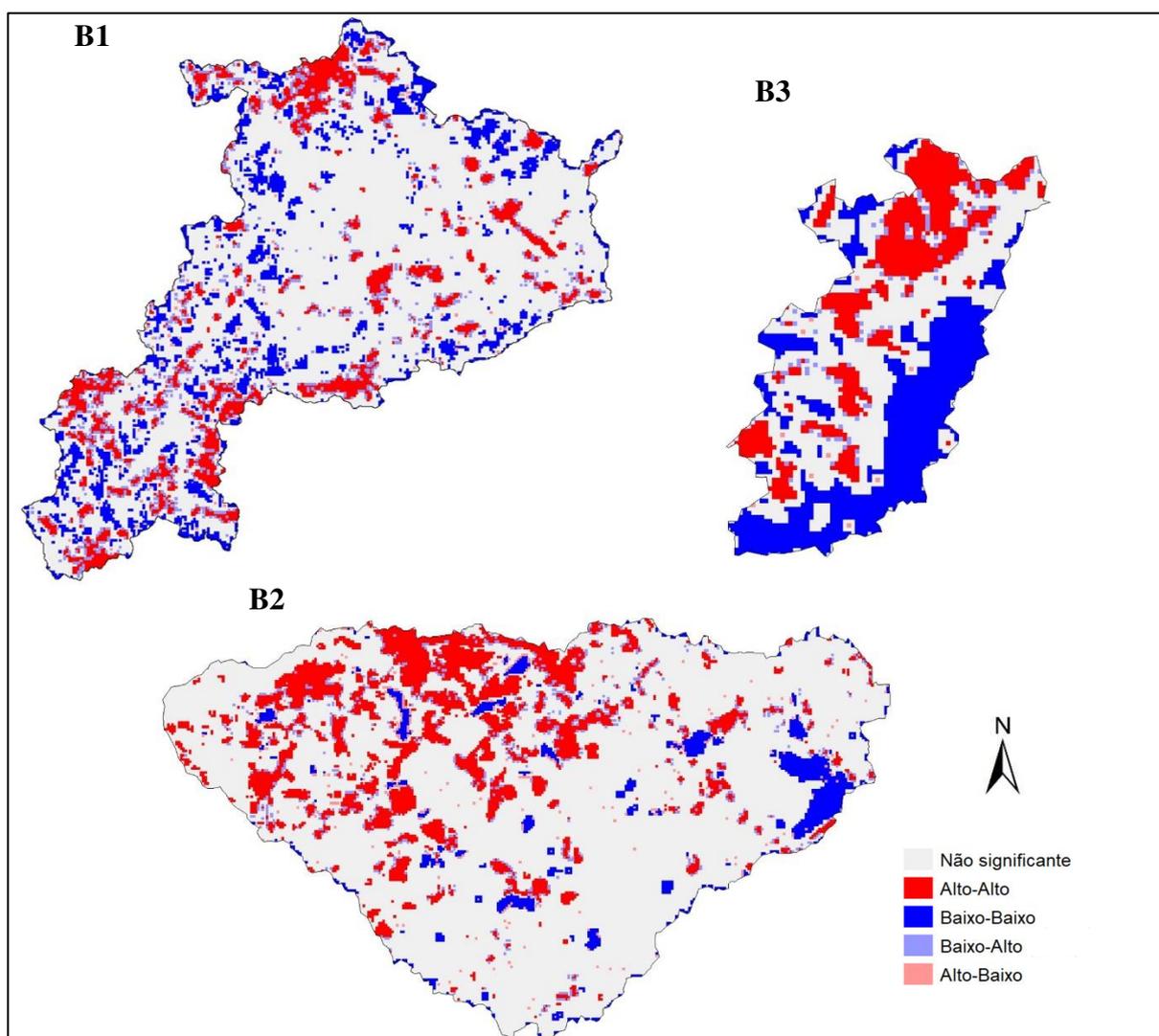
Segundo o padrão do método, a hipótese nula é que não existe autocorrelação espacial entre os dados. O Índice de Moran Global para as classes de priorização de áreas das microbacias, apresentou valores positivos de 0,413, 0,592 e 0,601 para B1, B2 e B3, respectivamente, sendo estatisticamente significativos, com *p-value* igual a 0,000 em todas as bacias, permitindo rejeitar a hipótese nula, indicando que existe correlação espacial de agrupamento, mostrando que as áreas prioritárias para conservação tendem a se agrupar espacialmente.

Por meio do Índice de Moran local (LISA) (Figura 19), foram identificados os aglomerados de alto risco (*cluster* alto-alto), que são as áreas que tiveram resultado do modelo APC-AHP muito alto e alto e que também estão cercadas por áreas com valores muito alto e alto. O *cluster* alto-alto foi o que apresentou maior proporção dentro das bacias, quando comparado com o baixo-baixo, alto-baixo e baixo-alto. Essas áreas são as que estão sofrendo mais pressão e necessitando de ações que controlem o desmatamento, a recuperação da vegetação, e proteção dos recursos hídricos, protegendo assim todos os serviços ecossistêmicos oferecidos pela bacia.

Na B1 essas áreas de alto risco correspondem a 1195 ha (11,7%), estando mais concentradas na porção sul da bacia, no município de Aratuba e na sede municipal de Mulungu (*cluster* ao norte), este último demonstra a crescente expansão e descaracterização da paisagem em áreas próximas à sede. Na B2 (15%), esses aglomerados de alto risco se concentraram na porção noroeste da Bacia, onde os processos de expansão urbana e de agricultura são mais intensos e próximos aos recursos hídricos. Essas áreas correspondem a 2149 ha. Na B3, o *cluster* alto-alto corresponde a 340,9 ha (21,4%), se concentrando na porção norte e central da bacia. Na porção norte há intenso processo de desmatamento para venda de lotes residenciais.

Vale destacar, que o *cluster* Baixo-Alto representa uma importante ferramenta de gestão no que concerne a prever a tendência do crescimento urbano nessas bacias. Uma vez que representam áreas de baixo e média priorização conforme modelo APC-AHP, já que se encontram mais preservadas, no entanto, estão circundadas por áreas que já sofrem com alterações de sua paisagem por atividades humanas, podendo sofrer pressão da expansão da urbanização e agrícola.

Figura 19 – Autocorrelação espacial do indicador Local de Moran (LISA) para as áreas prioritárias à conservação na B1, B2 e B3.



Fonte: Autora.

4.4 Conclusões

A aplicação de técnicas de geoprocessamento com o uso de bases públicas, hoje disponíveis no Brasil, permite aproximações e a geração de dados de boa qualidade para a tomada de decisão. Melhorar a disponibilidade e a colaboração entre instituições, para a geração de dados com escalas de maior detalhe, são necessários e permitirão uma melhor acurácia dos produtos.

A análise multicritério deve ser usada para apoiar o processo de tomada de decisão, considerando múltiplos critérios e que contemple as especificidades de cada bacia hidrográfica. O modelo APC-AHP demonstra ser eficiente e prático, sinalizando as áreas prioritárias a

conservação dos recursos hídricos, tendo potencial como instrumento de gestão em ações que visem a restauração florestal e o manejo sustentável a fim de mitigar os impactos da degradação e melhorar a resiliência das bacias hidrográficas. O Governo do Estado do Ceará sancionou em julho de 2023 a Política Estadual de Pagamentos sobre Serviços Ambientais e Ecosistêmicos (PSA), visando fomentar a proteção e a conservação dos ecossistemas cearenses. Neste sentido, o modelo apresentado pode ser utilizado como norteador das áreas que merecem maiores cuidados, incentivando proprietários, agricultores e comunidades nas boas práticas de conservação e recuperação de áreas produtoras de água.

5 CONSERVAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS E SUAS IMPLICAÇÕES NOS SERVIÇOS AMBIENTAIS

5.1 Introdução

As bacias hidrográficas desempenham um papel fundamental na manutenção dos serviços ambientais, sendo estes a regulação do ciclo hidrológico, provisão de água em quantidade e qualidade adequadas, conservação da biodiversidade, recreação e bem-estar humano, e resiliência às mudanças climáticas (Camelo; Sanches, 2019). O estado de saúde das bacias hidrográficas deve-se a muitos fatores que atuam simultaneamente, sendo as alterações climáticas um dos fatores que está a adquirir maior relevância (Ribeiro Neto *et al.*, 2016).

Neste contexto, a manutenção dos serviços ambientais são cruciais para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a conservação florestal desempenha um papel crucial no alcance destes. Na legislação brasileira, a temática dos serviços ambientais é abordada na Lei Federal n.º 12.651/2012, onde o Código Florestal, que reconhece a importância dos serviços ambientais fornecidos pelos ecossistemas, como a proteção dos recursos hídricos, e estabelece mecanismos para a sua preservação (Brasil, 2012). A Lei Federal n.º 9.985/2000 - Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), define sobre a criação e gestão das Unidades de Conservação (UC), como fator fundamental na conservação da biodiversidade e na provisão de serviços ambientais, como a regulação do clima e a proteção dos recursos hídricos (Brasil, 2000). A Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei Federal n.º 9.433/1997, reconhece a importância da conservação das bacias hidrográficas para a garantia da quantidade e qualidade da água, abordando indiretamente a temática dos serviços ambientais relacionados aos recursos hídricos (Brasil, 1997). A Lei n.º 14.119/21 institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, cujo objetivo é remunerar os proprietários rurais pela conservação e recuperação dos ecossistemas naturais (Brasil, 2021).

Este capítulo visa identificar alguns dos serviços ambientais proporcionados pela conservação de bacias hidrográficas, considerando, diferentes indicadores e abordagens metodológicas, fornecendo informações para a tomada de decisão, visando a manutenção e potencialização dos serviços ambientais fornecidos pelas bacias hidrográficas. Para este propósito, foram realizados dois estudos de caso, o primeiro é referente à análise comparativa das mudanças de uso e cobertura da terra e sua relação com temperatura de superfície em duas microbacias (B1 e B2, Serra e Sertão respectivamente), e o segundo à Dinâmica da cobertura de Manguezais no Estuário do Rio Choró - CE e sua relação com o sequestro de carbono (próximo à bacia B3, Litoral).

5.2 Estudo de caso 1: Análise comparativa das mudanças de uso e cobertura da terra e sua relação com temperatura de superfície das bacias hidrográficas

5.2.1 Introdução

Mudanças no uso e cobertura da terra, como urbanização, agricultura e desmatamento, podem impactar significativamente a temperatura da superfície terrestre (TST) e os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, além de influenciar no conforto térmico da população (Correia Filho *et al.*, 2019). Segundo o sexto relatório de mudanças climáticas (IPCC, 2022), a mudança de cobertura da terra com o desmatamento tem sido um dos impulsionadores da temperatura média global da superfície. Vários estudos examinaram a relação entre o TST e os diferentes tipos de cobertura da terra, utilizando sensoriamento remoto em diversos países como China, Irã, Congo, Dinamarca, Brasil (Alexander, 2020; Correia Filho *et al.*, 2019; Das Majumdar; Biswas, 2016; De Moura Neto *et al.*, 2022; Deng *et al.*, 2018; Liao; Rigden; Li, 2018; Mansourmoghaddam *et al.*, 2023; Omeno *et al.*, 2021; Safarrad *et al.*, 2021; Sayão *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2022).

A vegetação pode efetivamente influenciar a TST, absorvendo e refletindo a energia da radiação solar e regulando a troca de calor latente e sensível, desempenhando um papel importante nas interações terra-atmosfera e o clima global (Deng *et al.*, 2018). O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é o parâmetro mais amplamente utilizado para descrever a vegetação na superfície terrestre, e pode ser utilizado para medir a mudança da cobertura vegetal e a atividade fotossintética, seja na presença ou ausência de precipitação (Alexander, 2020).

A quantificação das contribuições do uso e cobertura da terra nas mudanças da TST é de grande interesse, pois melhora a compreensão dos impactos da cobertura do solo no clima local (Liao; Rigden; Li, 2018), como serve de estratégia para formulação de políticas públicas para o planejamento de bacias hidrográficas. Sendo assim, o objetivo deste estudo é analisar o padrão espacial de TST nas microbacias B1 e B2 (Serra e Sertão), e sua correlação com a cobertura da terra, utilizando o NDVI como índice espectral da vegetação, a fim de verificar como a conservação das bacias hidrográficas podem influenciar nas alterações de temperatura da superfície.

5.2.2 Material e Métodos

As áreas analisadas correspondem às bacias B1 e B2. Os dados de entrada foram imagens de satélite Landsat 8, foram obtidas do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos

(USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Houve dificuldade em se obter imagens, com datas próximas, fora do período chuvoso, e sem cobertura de nuvem, a fim de se obter uma maior confiabilidade dos dados.

As imagens que mais se adequaram aos critérios foram com as datas de 01/07/2013 e 27/08/2022. As bandas da Landsat 8 utilizadas foram: B4 (banda do vermelho), B5 (banda próximo ao infravermelho) e B10 (banda termal). A resolução espacial das bandas térmicas geralmente é menor do que das demais bandas, tendo resolução espacial de 100m. (Alexander, 2020).

A temperatura da superfície terrestre foi estimada usando a banda termal da Landsat 8 e o software QGIS. Os números digitais da banda termal foram convertidos em radiância no topo da atmosfera e em seguida, a radiância espectral foi convertida em temperatura de brilho. Esse processo foi realizado usando o plugin SCP do QGIS. A TST foi calculada a partir da temperatura de brilho usando correção de emissividade conforme Equação 7 (Alexander, 2020; Mansourmoghaddam *et al.*, 2023; Sayão *et al.*, 2020)

$$LST = \left[\frac{\tau}{1 + \omega \left(\frac{k_1}{\tau} \right) \ln(e)} \right] \quad (7)$$

Onde, LST é temperatura de superfície em kelvin; τ é a temperatura de brilho; ω é o comprimento de onda do brilho emitido (para a banda 10 do Landsat 8 corresponde a 10,8 μm); $k_1 = 14388 \mu\text{m}$, constante de Planck multiplicada pela razão entre a velocidade da luz e a constante de Boltzmann; e (e) é a emissividade (Borges; Batista, 2020; Mansourmoghaddam *et al.*, 2023). Para temperatura da superfície em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), os valores de temperatura em Kelvin foram subtraídos de 273,15.

A emissividade (e) é a eficiência de transmissão de energia térmica, variando de acordo com a composição da superfície (Alexander, 2020). Os valores de emissividade (e) foram gerados a partir do mapa de cobertura do solo, apresentados anteriormente, para os anos de 2013 e 2022, e por meio de reclassificação, foi aplicado a cada classe valores de emissividade: áreas antropizadas (0,94), florestas (0,98), água (0,98) e agricultura (0,97) (BORGES; BATISTA, 2020).

Os valores de NDVI variam de -1 a +1, com altos valores positivos indicando árvores, pequenos valores positivos indicando terrenos construídos ou solos expostos e valores negativos representando corpos d'água (Mansourmoghaddam *et al.*, 2023) Para medir o NDVI,

os valores de refletância das bandas do vermelho (R) e do infravermelho próximo (NIR), correspondem às bandas 4 e 5, na Landsat 8, e o cálculo é conforme a Equação 8.

$$NDVI = \left(\frac{NIR - R}{NIR + R} \right) \quad (8)$$

Para as análises estatísticas foi utilizado o software estatístico SPSS (*Statistical Package for Social Science*).

5.2.3 Resultados e Discussão

Os mapas de TST para as bacias B1 e B2 (Figura 21), apresentaram variação da temperatura nos anos analisados. A temperatura média observada no ano de 2013, na B1, área serrana com predominância de floresta tropical, foi de 22,45 °C (DP=1,7), com temperatura máxima de 28,8°C e mínima de 19,9°C. Já em 2022, a temperatura média observada foi 24,7°C (DP=1,90), com máxima de 35,6 °C e mínima de 16,6°C. Aplicando o Teste T, para comparação de médias de amostras não paramétricas e pareadas, foi verificada diferença estatística nas temperaturas entre os anos de 2013 e 2022 (T=18,277 $p=0,000$), podendo afirmar que houve aumento da temperatura na microbacia da Serra (B1) em 2022. E essa diferença foi em média de 2,4 °C.

Na bacia do Sertão, B2, localizada no sertão central do Estado e com vegetação de caatinga, no ano de 2013, a temperatura média observada foi de 27,3°C (DP=1,07), a temperatura máxima foi de 31,1°C e a mínima de 22°C. No ano de 2022, a temperatura média foi de 32 °C (DP=1,79), a máxima de 38,5 °C e a mínima de 24,4°C. Comparado ao ano de 2013, a temperatura de 2022 apresentou diferença significativa (T=45,00 $p=0,000$), apresentando temperaturas mais altas de aproximadamente de 4,9°C de diferença.

As duas bacias sofreram redução de vegetação no ano de 2022, o que pode ter refletido no aumento da temperatura. A B1 teve a maior redução de cobertura vegetal no intervalo de anos analisados. Contudo, mesmo com o percentual de ocupação por florestas sendo igual, cerca de 76,5%, a bacia do sertão apresentou maior diferença de temperatura. Isso pode ser justificado pela presença de vegetação e solos mais úmidos, e uma vegetação mais arbórea e densa na bacia da serra.

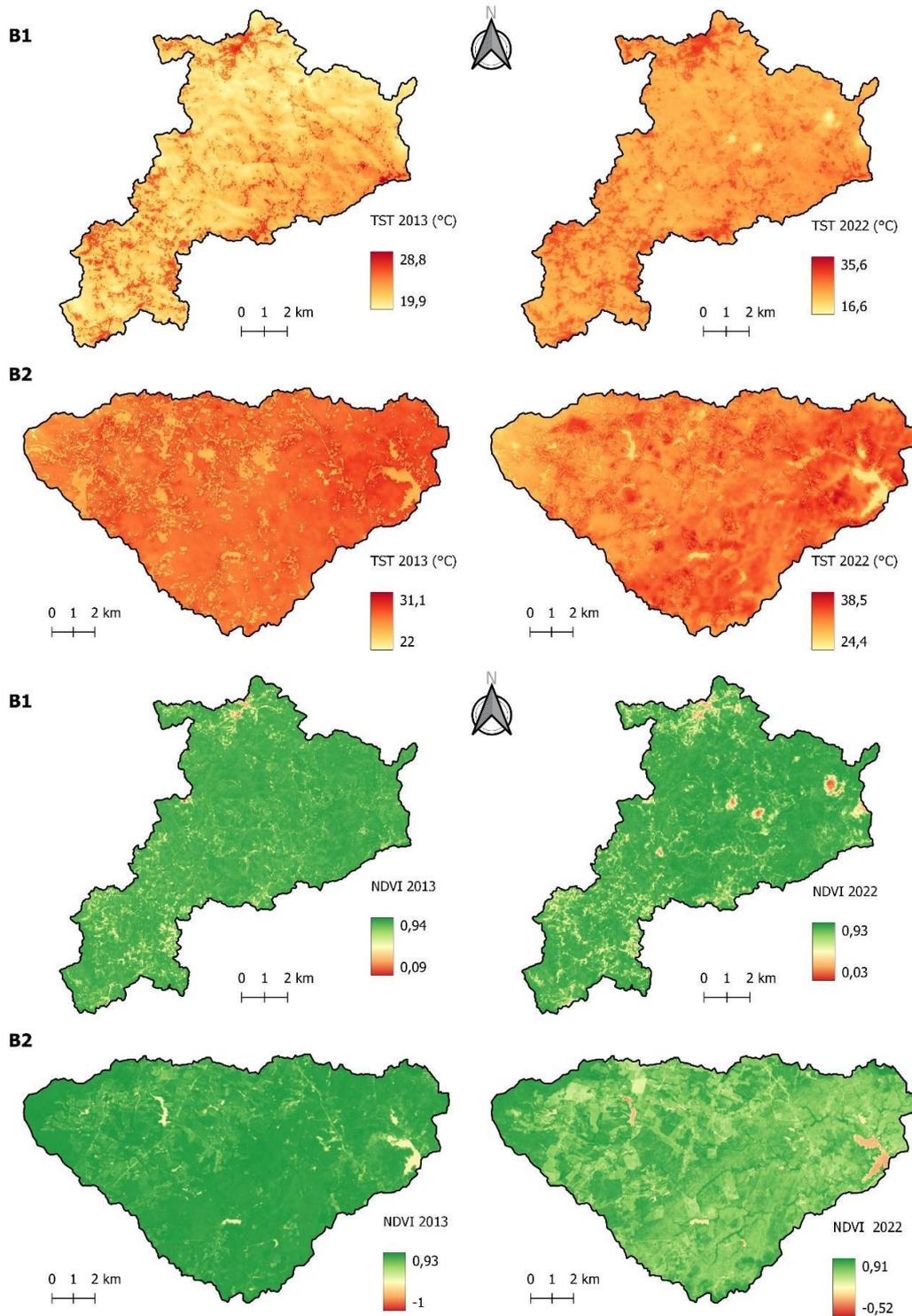
O aumento da temperatura da superfície nas bacias estudadas, pode estar relacionada às mudanças climáticas, não avaliado neste trabalho, mas os fatores que

potencializam esse aumento podem ser decorrentes de mudanças na cobertura do solo identificados. Em 1990, um modelo numérico acoplado da atmosfera global e da biosfera já demonstrava os efeitos do desmatamento da Amazônia no clima regional e global (Shukla; Nobre; Sellers, 1990). Quando as florestas tropicais do modelo foram substituídas por gramíneas (pastagens) degradadas, houve um aumento significativo na temperatura da superfície e uma diminuição na evapotranspiração e na precipitação sobre a Amazônia. Na simulação, a duração da estação seca também aumentou. Tal aumento poderia tornar particularmente difícil o restabelecimento das florestas tropicais após o desmatamento em quantidade excessiva (Shukla; Nobre; Sellers, 1990).

Este estudo confirma esse modelo antigo, os resultados sinalizam uma preocupação com aumento de temperatura na região serrana, devido ao crescimento do ambiente construído, promovidos principalmente pelo turismo e expansão urbana. Essas construções causam mudanças espaciais e físicas, devido ao desmatamento, levando as alterações nos parâmetros climáticos, devido às mudanças do albedo no local (Safarrad *et al.*, 2021), podendo promover desequilíbrio no ecossistema. O pior é que quando isso acontece, quando há desmatamento contínuo, lugares que antes eram sumidouros de carbono se tornam emissores de carbono (Gatti *et al.*, 2021). Nesse caso, a temperatura aumenta e certamente também a capacidade de imobilizar o carbono. Tem sido sugerido que as florestas tropicais da África e América do Sul podem estar no limite de absorção de CO₂, devido a fatores climatológicos (mudanças climáticas) e fatores de gestão (Hubau *et al.*, 2020). Isso significa que sequestro de carbono (estas florestas são responsáveis por 50% da absorção de CO₂ nas áreas terrestres, e 15% dos gases de efeito estufa são capturados por esses complexos habitats) podem estar saturados ou mesmo em declínio (Hubau *et al.*, 2020).

A sensibilidade da bacia do sertão, inserida em condições semiáridas, ao aumento da temperatura, reflete principalmente no aumento da evapotranspiração (De Moura Neto *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2022), causando a diminuição da disponibilidade hídrica dos mananciais superficiais, principal fonte de abastecimento de água nos sertões cearenses. Em geral, a conversão em larga escala de florestas tropicais em pastagens ou culturas anuais foi prevista que mudasse o microclima local dessas regiões, como consta na Figura 20 (Nobre, 1991). São esperadas maiores flutuações diurnas de temperatura superficial e déficit de umidade, aumento do escoamento superficial durante os períodos chuvosos e diminuição do escoamento durante a estação seca, e diminuição da umidade do solo (Nobre, 1991).

Figura 20 - Mapas de Temperatura (TST) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da superfície terrestre na B1 e B2 nos anos de 2013 e 2022.



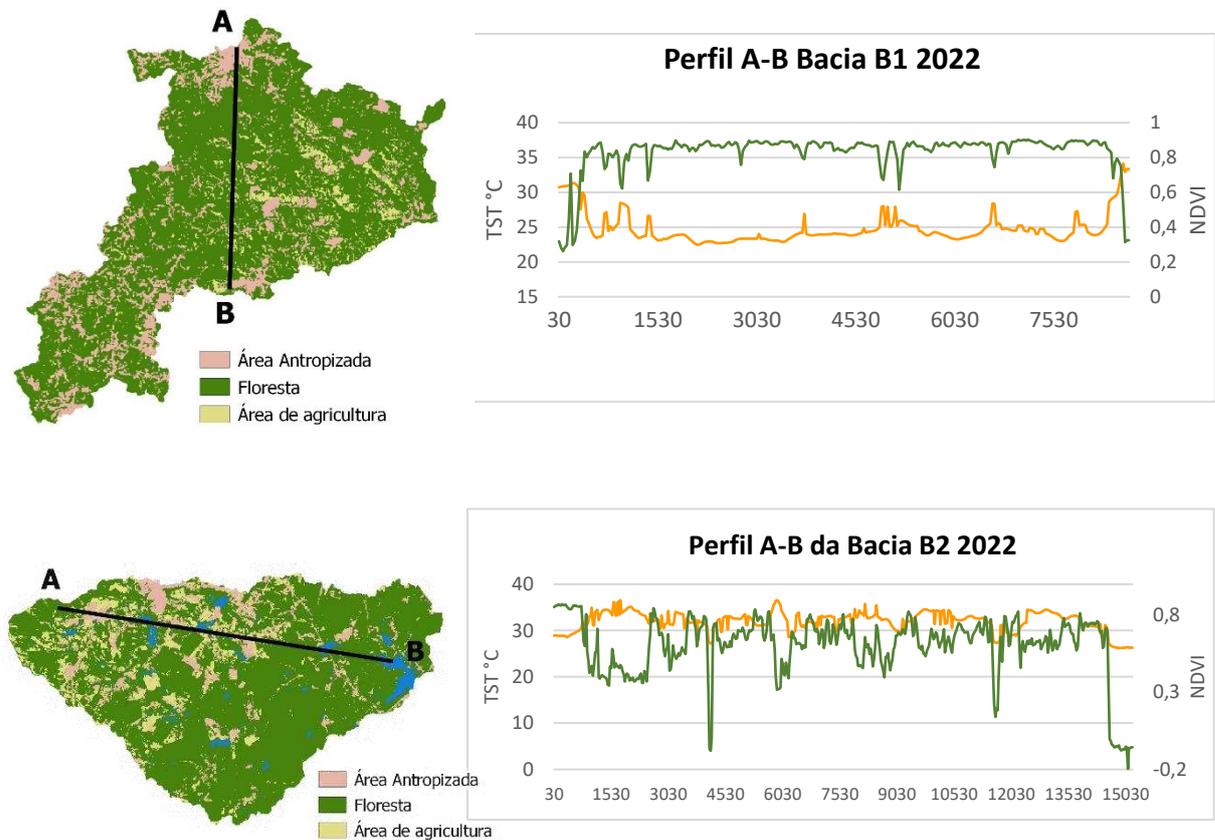
Fonte: Autora.

No estudo, na bacia B1, no ano de 2022, foram detectados 3 agrupamentos com comportamentos anômalos na imagem. Após verificação com imagens de alta resolução no

Google Earth Pro, foi confirmado se tratar de nuvem. No entanto, esses pontos não comprometeram as análises dos dados.

O TST e o NDVI exibiram padrões de distribuição espacial opostos. Analisando a Figura 21, fica perceptível, que os pontos mais quentes correspondem às áreas urbanizadas, sendo estas as áreas de cidades, povoados, estradas e áreas com solo exposto. Foi traçado um perfil A-B (Figura 21) a fim de verificar as amplitudes e relações entre TST e NDVI (Deng *et al.*, 2018). Foi utilizado o ano de 2022 para a análise.

Figura 21 - Perfil mostrando a variabilidade de TST e NDVI nas bacias B1 e B2 no ano de 2022.



Fonte: Autora.

O TST mostrou tendência oposta ao NDVI. Os picos altos de NDVI correspondem as áreas com cobertura vegetal, apresentando as temperaturas mais baixas. Os picos mais baixos correspondem às áreas antropizadas (urbanização, solo exposto). Os picos de NDVI na B2 abaixo de zero, correspondem aos corpos d'água, mostrando temperaturas também mais baixas.

Ampliando a análise para toda a bacia, a fim de verificar a correlação entre os valores de TST e NDVI, foram definidos pontos amostrais gerados aleatoriamente no software

QGIS, com espaçamentos de 750 m. Para Bacia da Serra foram 394 pontos e Sertão foram 238 pontos. Foi aplicado o teste de normalidade de Kolmogorov-Sminorf e os resultados mostraram p-value igual a 0,000, indicado que os dados não apresentam distribuição normal e em função disso, foi aplicado o teste de correlação de Spearman, verificando se há existência de correlação entre os índices espectrais do NDVI e TST, para os anos de 2013 e 2022 nas duas bacias.

Na B1, a correlação foi de -0,218 e -0,403, para 2013 e 2022, respectivamente. Já para B2, foram encontradas as correlações de -0,250 e -0,473, todas com $p < 0,001$. Os resultados sugerem uma correlação negativa de força fraca a moderada, em que à medida que o NDVI aumenta, a TST diminui, indicando que a presença da vegetação e presença de água, proporciona um abrandamento da temperatura, e conseqüentemente, áreas urbanizadas e solos expostos apresentam temperaturas mais altas. Estes resultados corroboram com os encontrados por Oliveira Júnior *et al.* (2023) nos sertões pernambucanos, consequência do avanço do processo de degradação da cobertura vegetal do solo em ambientes áridos e semiáridos.

5.2.4 Conclusões

É essencial aplicar esses modelos para a gestão de longo prazo dos recursos naturais nas bacias hidrográficas. Podemos sugerir que, a médio-longo prazo, o desmatamento pode estar por trás de uma mudança local no clima desta área. Cenários realistas com o presente desmatamento sugerem limiares críticos além dos quais a precipitação é substancialmente reduzida. Em modelos regionais de mesma escala que capturam a topografia e as discontinuidades baseadas na vegetação, existe um limite crítico de desmatamento, além do qual a precipitação pode diminuir. A produtividade agrícola e o abastecimento de água nos trópicos correm risco com o aumento da temperatura média, associados ao aumento dos eventos de seca e de um declínio na precipitação média ou na frequência das chuvas, induzido pelo desmatamento.

5.3 Estudo 2: Dinâmica da cobertura de Manguezais no Estuário do Rio Choró-CE e sua relação com o sequestro de carbono

5.3.1 Introdução

Os manguezais são ecossistemas costeiros de grande relevância ecológica e socioeconômica, abrigando uma rica biodiversidade e fornecendo inúmeros serviços ambientais

essenciais (Godoy; Meireles; Lacerda, 2018; Thiers; Meireles; Santos, 2016). Os manguezais também são responsáveis pelo controle do processo erosivo nas áreas costeiras, a densa vegetação dos manguezais atua como uma barreira natural que reduz a força das ondas e tempestades, protegendo as comunidades costeiras e as infraestruturas contra danos significativos (De Lacerda *et al.*, 2021; Gilani *et al.*, 2021; Queiroz *et al.*, 2013).

Esses sistemas fornecem pelo menos US\$ 1,6 bilhão por ano em serviços ecossistêmicos, apoiando a subsistência de comunidades costeiras com matéria-prima, materiais e alimentos, proteção costeira, controle da erosão do solo, purificação da água, manutenção da pesca e sequestro de carbono, bem como recreação, educação e pesquisa (Barbier *et al.*, 2011). Esses ecossistemas desempenham também um papel fundamental no sequestro de carbono atmosférico, ajudando a mitigar os efeitos do aquecimento global e das mudanças climáticas (Macreadie *et al.*, 2019). São considerados grandes sumidouros de carbono, acumulando cerca de 10 vezes mais carbono do que outros tipos de floresta (Kauffman *et al.*, 2018), reduzindo a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, só superados por fazendas de fanerógamas marinhas (Duarte *et al.*, 2017).

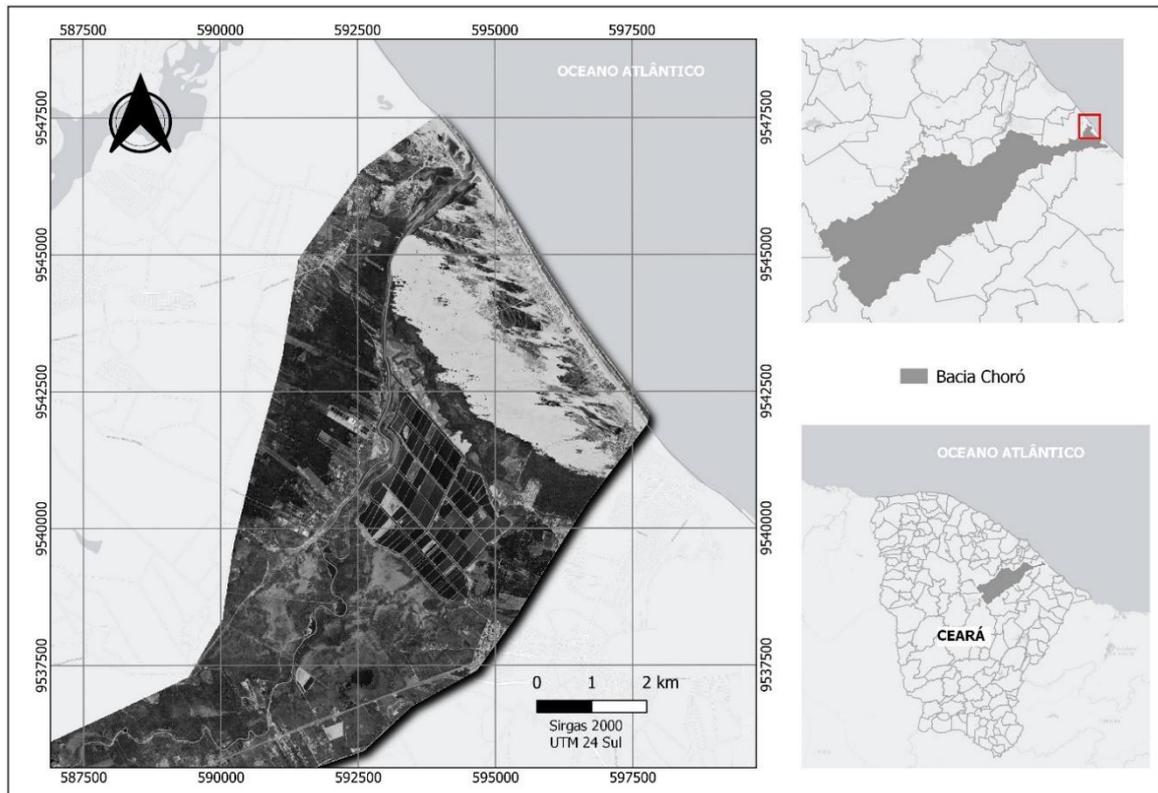
Por serem ecossistemas dinâmicos, mudanças são observadas em quase todas as partes do mundo (Bunting *et al.*, 2022). A sociedade sempre se deparou com a decisão de como gerenciar ecossistemas para a sustentabilidade. Isso também é verdade para o ecossistema de mangue, que muitas vezes foi convertido para uso alternativo, com base apenas na consideração econômica por parte das políticas locais (James *et al.*, 2013). Apesar do valor ecológico que os manguezais fornecem, eles são vulneráveis à perda devido à urbanização, carcinicultura, modificações dos regimes hidrodinâmicos dos rios, erosão costeira e às mudanças climáticas com os eventos extremos (Gilani *et al.*, 2021; Kauffman *et al.*, 2018),

A preservação e a restauração dos manguezais são cruciais para garantir a continuidade desses relevantes serviços ambientais para o meio ambiente e a população local (De Lacerda *et al.*, 2021). É necessária uma maior valorização das múltiplas funções ecológicas, produtos e serviços produzidos por essas zonas úmidas costeiras, devendo ter sua proteção subsidiadas por políticas públicas e estratégias de gestão e conservação mais específicas.

A capacidade de imobilizar carbono é fundamental, e as longas séries temporais permitem ver se em determinados locais temos perda ou ganho dessa capacidade. Essas séries temporais são a base para a gestão do território como fator essencial nos créditos de carbono, focando sua mudança conforme os impactos que possam ter sofrido nas últimas décadas. O rastreamento por satélite tem se mostrado realmente eficaz se as ferramentas usadas e as conversões usadas forem as corretas (Queiroz *et al.*, 2013). Com base no exposto, o objetivo

deste estudo foi analisar as mudanças na cobertura dos manguezais entre os anos de 1985 e 2021, na foz do Rio Choró, no estado do Ceará (Figura 22), e estimar o potencial sequestro de carbono desse ecossistema.

Figura 22 – Localização da Área de Estudo



Fonte: Autora.

5.3.2 Material e Métodos

Para identificar as mudanças que ocorreram na foz do rio Choró, referentes as áreas de manguezal, apicuns, carcinicultura e ocupação urbana ao longo dos últimos 36 anos, foram utilizados os dados de uso e cobertura da terra, da coleção 7 do projeto MapBiomas (<http://mapbiomas.org/>), disponibilizados gratuitamente, com tamanho de pixel de 30m (Cruz; Cruz, 2021; De Moura Neto *et al.*, 2022; Oliveira Júnior *et al.*, 2023). Os dados foram extraídos para a área de interesse e reprojatados para o Datum SIRGAS 2000 e sistema de coordenadas UTM, Zona 24 sul. As dinâmicas de alterações das classes observadas foram realizadas com a função *Land Change* do plugin SCP (*Semiautomatic Classification Plugin*) do QGIS (Congedo, 2014).

A seleção dos anos utilizou como referência a metodologia de Queiroz (2018), com a escolha de anos-padrão. A escolha levou em consideração os anos classificados como secos ou chuvosos da Bacia do Choró, disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e

Recursos Hídricos por meio do seu Portal Hidrológico (<http://www.hidro.ce.gov.br>), e eventos antrópicos como os impactos no regime hidrológico do baixo curso e instalação de viveiros de carcinicultura.

Foi aplicado o teste estatístico de Mann-Kendall, para detectar possíveis tendências de aumento ou redução das classes estudadas no período de 36 anos. O teste de Mann-Kendall é um teste de hipóteses, não paramétrico, baseado na distribuição das observações ao longo do tempo (De Moura Neto *et al.*, 2022; Oliveira Júnior *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2022). Este teste obedece a Equação (9).

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{ sinal}(x_i - x_j) \quad \text{onde: } \text{ sinal}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (9)$$

A distribuição de probabilidade da estatística S tende à normalidade quando $n > 8$, com média zero e variância dada por Equação (10):

$$\text{Var}(s) = \frac{1}{18} \left[n(n-1) \cdot (2n+5) - \sum_{p=1}^q (t_p - 1)(2t_p + 5) \right] \quad (10)$$

O teste Mann-Kendall, fornece uma medida de consistência, no entanto, não especifica sua magnitude (ou seja, o quanto eles mudam). Para quantificar a amplitude das tendências espaço-temporais das variáveis analisadas nesse estudo, foi aplicado o teste não paramétrico Sen's Slope Estimator (SSE) como mostra a Equação (11) (Oliveira Júnior *et al.*, 2023; Reygadas; Jensen; Moisen, 2019).

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, 4 \dots N \quad (11)$$

Onde, x_j e x_k são os valores das séries temporais no tempo j e K .

Visando verificar um dos serviços ambientais proporcionados pelo ecossistema manguezal do Rio Choró, foi estimado o estoque de carbono (C), multiplicando a área do manguezal obtida pelo mapbiomas, pelo valor de estoque de carbono do ecossistema por unidade de área. O valor de referência de estoque de carbono adotado foi de 413 Mg C/ha. Este valor médio de estoque de carbono foi observado em oito manguezais do Estado do Ceará (Kauffman *et al.*, 2018), áreas estas que mais se aproximam das características do manguezal do Rio Choró.

Os valores de carbono podem ser convertidos em dióxido de carbono (CO₂), multiplicando seus valores por 3,67, razão entre os pesos moleculares de CO₂ e C (Kauffman; Donato, 2012), sendo possível estimar a emissão de carbono por área de mangue a vir a ser desmatada.

5.3.3 Resultados e Discussão

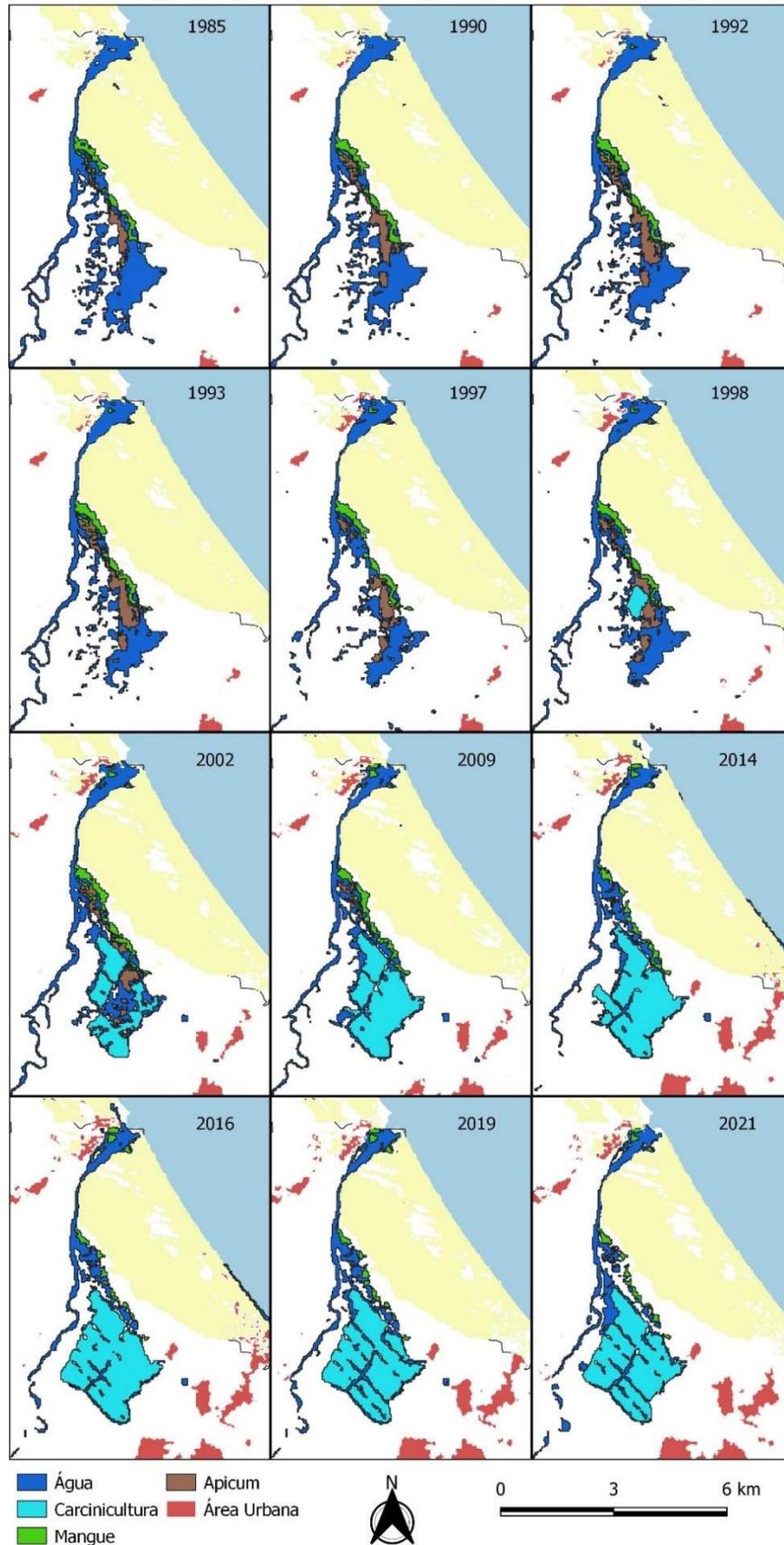
A variação temporal das áreas de manguezal ao longo de 36 anos mostrou que a área de mangue, em 1985, ocupava uma extensão territorial de 48,37 ha e, no ano de 2021, com 37,92 ha de área, uma redução de 36,09%. No entanto, essa redução não foi uniforme. Foi possível observar, pela Figura 24, que do período inicial dos dados até o ano de 1992, o manguezal mostrou um crescimento linear de 1,71 ha/ano, ficando com 60,35 ha. A partir de 1992, a área de manguezal veio sofrendo redução, período este que foi inaugurado o açude de Pacajús, com capacidade de 0,25 hm³, situado aproximadamente a 25 km a montante da área estudada, reforçando o sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza num período de crise hídrica no Estado (Ceará, 2018). A dinâmica fluvial do rio sofreu alteração, podendo ter contribuído com a redução do manguezal em virtude do menor aporte de nutrientes e hipersanilização (Cidreira, 2014).

Esse momento correspondeu também à mudança espacial das áreas de manguezais, a região mais expressiva, que fica na parte central da cena (Figura 24), ao sul do campo de dunas, passou a perder área, ao tempo que houve um crescimento de mangue na margem esquerda da foz do rio Choró. Este fato pode estar associado à formação de um banco de areia no local mencionado, o que permitiu a expansão do mangue. No ano de 1998, o manguezal apresentou redução de 3,6 ha, comparada ao ano de 1997. Foi possível verificar pelas imagens que foi o período em que houve desmatamento do mangue e ocupação das áreas de apicum para instalações de viveiros de camarão.

Entre os anos de 1998 e 2002, houve um aumento anual de 2,52 ha de manguezal, um aumento de 40,8 ha/ano de áreas ocupadas pela carcinicultura e redução de 13 ha de apicum nesse intervalo. De 2002 até 2019, o manguezal e apicum perderam 26,7 ha e 50,5 ha, respectivamente, enquanto a carcinicultura teve um aumento de área de 208 ha. Até o ano de 2021, não houve mudanças significativas. Deve-se levar em conta que o mangue captura carbono em função de sua maturidade. Os manguezais mais jovens sequestram mais carbono em sua parte aérea, mas menos nos sedimentos e no solo que os cercam (Lunstrum; Chen, 2014).

De 1997 a 2021, a carcinicultura passou a ocupar uma área de 404,25 ha, espaços antes ocupados por áreas alagadas, manguezais e apicuns, isso representa um crescimento de 1204,65%. O mangue apresentou uma redução de 19,46 ha, cerca de 21,6% da sua área em 1985, e redução de 60,80 ha de apicum (-91,8%). A mancha urbana, no período inicial da área analisada, ocupava 59,33 ha e no ano de 2021, essa área passou a ter 470 ha, um aumento de 692%, como na Figura 23. A rápida evolução das fazendas de camarão em relação aos ecossistemas de mangue minimizou a disponibilidade de serviços, comprometendo a sustentabilidade socioambiental da zona costeira do Brasil para o médio e longo prazo (Queiroz *et al.*, 2013). Os impactos estão presentes não só do ponto de vista ambiental, mas também do ponto de vista social e econômico, incluindo o aumento da pobreza, falta de terra e insegurança alimentar, deslocamento de comunidades, contaminação de água potável, más condições de trabalho, saúde e educação e, em alguns países, a violação dos direitos humanos (Queiroz *et al.*, 2013).

Figura 23 – Mudanças na cobertura de mangue com base nas imagens do Mapbiomas na foz do Rio Choró (1985-2021).



Fonte: Autora.

Embora sejam perceptíveis as mudanças ocorridas nos últimos 36 anos, é importante verificar se há ou não, a existência de tendência dessas classes aumentarem ou diminuir com o tempo. Aplicando o teste Mann-Kendall, foi observado que a carcinicultura, as áreas de apicum e áreas urbanas possuem uma tendência significativa, enquanto os manguezais não apresentaram tendência significativa ($p > 0,05$) (Tabela 8).

O teste de Sen's Slope foi aplicado para verificar a magnitude dessas tendências, onde foi constatado que a carcinicultura e áreas urbanas apresentam tendência significativa de crescimento de 13,90 ha e 12,093 ha. As áreas de apicum apresentam uma tendência significativa de redução de 2,60 ha. A variável correspondente aos manguezais não apresentou tendência estatisticamente significativa. As comunidades de mangue são relativamente dinâmicas, uma vez que são alvo de acelerado desmatamento, podem se regenerar, também, de uma forma rápida, quando em condições do meio adequadas (De Alban *et al.*, 2020), mas a sua eficácia como sumidouros de carbono não é a mesma quando são mais antigos (Lunstrum; Chen, 2014).

Tabela 8 - Tabela com Kendall's Tau, estimador de Sen's e significância estatística (1985-2021).

Variáveis	Kendall's Tau	Sen's slope (ha)	p-value
Carcinicultura	0,855	13,904	0,000
Manguezal	-0,394	-0,650	0,086
Apicum	-0,606	-2,594	0,007
Área Urbana	0,939	12,093	<0,0001

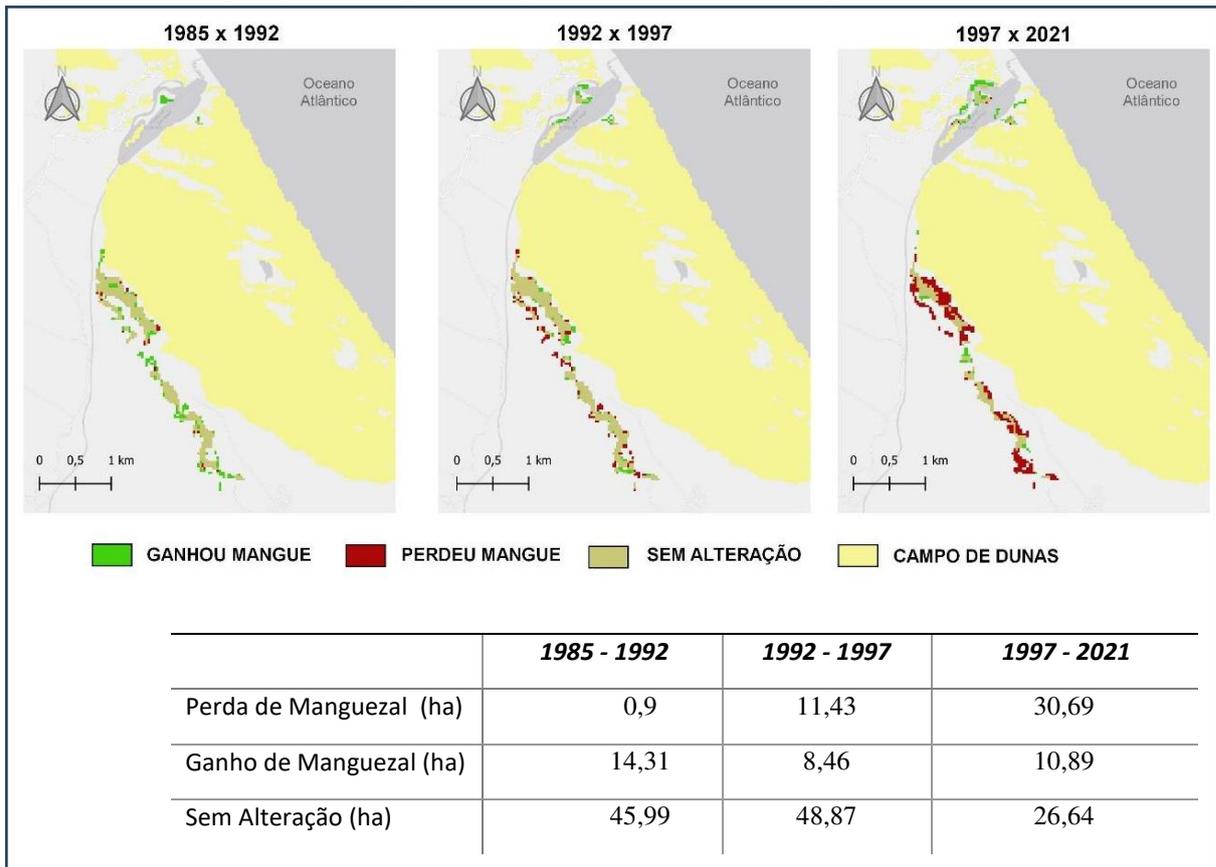
Fonte: Autora.

Utilizando como referência os anos com eventos antrópicos significativos para a região, é o caso de 1992, com a construção do açude Pacajus que alterou a dinâmica fluvial do Rio Choró até sua foz, e o ano de 1997, último ano sem a interferência da carcinicultura na área, foi gerada a matriz de mudança, sendo possível quantificar e visualizar espacialmente, os locais onde o manguezal perdeu e ganhou área.

Na Figura 24, é possível observar que apenas no intervalo de 1985-1992 o ganho de áreas de manguezal foi maior que sua remoção. O período após o barramento do rio Choró, já mostra uma perda de 11,43 ha de mangue e uma mudança espacial no crescimento dele. De 1997 até 2021, é acrescida a presença da carcinicultura, com remoção de área três vezes maior

que sua expansão. E essas áreas foram perdidas para as fazendas de carcinicultura da região. Esses resultados corroboram com o estudo de Thiers; Meireles; Santos (2016) sobre a evolução das áreas de manguezais em oito estuários do litoral cearense entre 1984 a 2004, identificando que a carcinicultura é o principal vetor limitante da expansão dos manguezais.

Figura 24 – Comparação entre perdas e ganhos de áreas do manguezal do Rio Choró.



Fonte: Autora.

A Tabela 9 apresenta as estimativas de estoque de carbono para cada ano analisado. A estimativa de estoque de carbono pela área de manguezal, para o ano de 1985, foi de 19,98 Gg, e em 2021 foi de 15,66 Gg. O ano que apresentou o maior estoque de carbono foi de 2002, com 26,38 Gg e os menores valores nos três últimos anos analisados, com a média de 15,44 Gg.

As emissões de dióxido de carbono foram calculadas com base em ΔA , que corresponde à diferença de área entre o ano observado e o ano anterior analisado. De 1985 até 1992, as análises do mapeamento do mapbiomas não indicaram redução de áreas de manguezais, sendo a partir de 1992 o início da diminuição de área de manguezal e suas possíveis emissões de CO₂ para a atmosfera. Analisando as emissões de CO₂, entre os anos de 1997-1998

e 2014-2016, foram os que apresentaram maiores valores anuais de emissão, com 5,46 Gg e 6,51Gg respectivamente. Com referência ao ano de 2021, se toda área de manguezal do rio Choró fosse desmatada, isso poderia acarretar emissão de 57 Gg de CO₂.

Tabela 9 - Estimativas de estoque de C e emissão de CO₂ no manguezal do Rio Choró (1985-2021).

Ano	Área (ha)	Estoque de C (Gg)	ΔA(ha)	Emissão de CO₂ (Gg)	Emissão de CO₂ (Gg) / ano
1985	48,37	19,98	-	-	
1990	57,47	23,73	-	-	
1992	60,35	24,92	-	-	
1993	59,63	24,63	-0,72	1,09	1,09
1997	57,38	23,70	-2,25	3,41	0,85
1998	53,77	22,21	-3,60	5,46	5,46
2002	63,86	26,38	-	-	
2009	59,18	24,44	-4,68	7,10	1,01
2014	45,58	18,82	-13,60	20,62	4,12
2016	36,99	15,28	-8,59	13,02	6,51
2019	37,09	15,32	-	-	
2021	37,92	15,66	-	-	

ΔA: diferença de área entre o ano observado e o ano anterior analisado.

Fonte: Autora.

Os dados públicos disponibilizados pelo projeto Mapbiomas passam a ser uma importante fonte de dados para uso da gestão pública, visto que os dados obtidos mostraram que não há conservação dessas áreas. A redução dos manguezais permite avaliar os impactos desse desmatamento nos serviços ambientais locais e globais prestados, a exemplo do aumento de emissões de gases de efeito estufa. No entanto, vale ressaltar, que para uma maior precisão do quantitativo de áreas, seria necessário o mapeamento dos manguezais com imagens de alta resolução.

5.3.4 Conclusões

Os resultados deste estudo mostraram uma redução significativa na cobertura de mangue e apicum no estuário do rio Choró entre os anos de 1985 e 2021. Os locais onde houve as maiores perdas de áreas, com base nas imagens de satélite, foi onde tiveram a instalação de fazendas de carcinicultura.

Se faz necessário e urgente, a implantação e ampliação de programas de conservação e reflorestamento de manguezais, bem como, legislações mais específicas que protejam esses ecossistemas. Em geral, as florestas hoje em dia também estão mudando rapidamente, sua capacidade de armazenar C também está em uma fase de transição. Por exemplo, de 1990 a 2015, uma área equivalente à África do Sul (129 106 ha) foi perdido em todo o mundo (0,13% da cobertura total da superfície) (Fao, 2016), e de 1920 a 1957, 8,8 Pg C foram liberados para a atmosfera devido à transformação de florestas em cultivos (Canadell *et al.*, 2007). O mau manejo florestal vem aumentando os impactos ambientais em diversas áreas. As análises regionais aqui apresentadas reforçam a necessidade urgente de ferramentas de gestão eficiente, onde o seu rigor no combate contra o desmatamento de florestas, permitirá, sem dúvida, a regeneração dos manguezais.

6 CONCLUSÕES

A presente tese, com base em estudos realizados em três microbacias hidrográficas do Ceará, conclui que o uso de técnicas de geoprocessamento com dados públicos é uma ferramenta poderosa para analisar e monitorar bacias hidrográficas. A metodologia de baixo custo desenvolvida, utilizando softwares livres, mostrou ser eficiente na geração de dados sobre uso e cobertura da terra com alta acurácia. A análise espacial e temporal do uso da terra evidenciou a necessidade de ações de manejo e conservação, especialmente nas áreas de serra e litoral.

A dinâmica do uso da terra nas bacias hidrográficas está diretamente relacionada às características ambientais e socioeconômicas da região. As florestas sofreram redução significativa de área em todas as microbacias, enquanto as áreas antropizadas apresentaram crescimento, especialmente nas bacias da serra e litoral. A bacia do sertão apresentou menor índice de desmatamento e ocupação irregular das áreas de preservação permanente (APPs). As características ambientais influenciam a dinâmica do uso da terra.

A análise multicritério é uma ferramenta útil para a tomada de decisão na gestão de bacias hidrográficas. O modelo APC-AHP se mostrou eficiente na identificação de áreas prioritárias para a conservação dos recursos hídricos. A Política Estadual de Pagamentos sobre Serviços Ambientais e Ecosistêmicos (PSA) do Ceará pode ser utilizada como instrumento para incentivar a conservação das áreas prioritárias.

O desmatamento pode levar a mudanças climáticas locais, afetando o abastecimento de água. A longo prazo, o desmatamento pode reduzir a produção de água e aumentar a temperatura média da região. Modelos regionais de mesma escala indicam que existe um limite crítico de desmatamento, além do qual a precipitação pode diminuir significativamente.

Os manguezais estão sob forte ameaça e precisam de medidas urgentes de proteção. A cobertura de mangue e apicum no estuário do rio Choró diminuiu significativamente entre 1985 e 2021. As principais causas da perda de manguezais são a instalação de fazendas de carcinicultura e o desmatamento. É necessário implantar e ampliar programas de conservação e reflorestamento de manguezais, bem como criar legislações mais específicas para proteger esses ecossistemas.

As florestas nas bacias do sertão, serra e litoral estão sofrendo perdas significativas e precisam ser manejadas de forma sustentável. Se faz urgente a implementação de ferramentas de gestão eficiente para combater o desmatamento e promover a regeneração das florestas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. E. S. DE; MESQUITA, J. L. B.; BERMUDEZ, L. F. M. Caracterização Geológica e Hidroquímica de Nascentes Visando sua Proteção Ambiental em Analândia, São Paulo - Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, n. 0, 31 mar. 2021. Disponível em: DOI https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_36479 Acesso em: 22 jul. 2023.
- ACCIOLY, L. J. DE O. *et al.* **Mapeamento do uso e cobertura das terras do Semiárido pernambucano**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2017. ISSN 1678-0892; 260. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1079144/mapeamento-do-uso-e-cobertura-das-terras-do-semiarido-pernambucano-escala-1100000>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- ADEM ESMAIL, B.; GENELETTI, D. Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. [S.l.]. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 9, n. 1, p. 42–53, jan. 2018. DOI <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12899> Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.12899> Acesso em: 21 jul. 2023.
- ALEXANDER, C. Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S.l.], v. 86, p. 102013, 1 abr. 2020. DOI 10.1016/j.jag.2019.102013 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243419307275> Acesso em: 21 jul. 2023.
- ALMEIDA, R. F. B.; FERREIRA JÚNIOR, L. G.; BAYER, M. Análise da cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do Rio do Coco e suas implicações sobre as áreas de preservação permanente como instrumento na gestão dos recursos hídricos. Curitiba, PR. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 49, n. 0, 30 dez. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v49i0.58652> Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/58652> Acesso em: 21 jul. 2023.
- ANDRADE, E. M. *et al.* Land Use Effect on the CN Model Parameters in a Tropical Dry Environment. **Water Resources Management**, [EUA], v. 31, n. 13, p. 4103–4116, 1 out. 2017. DOI:10.1007/s11269-017-1732-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1732-4> Acesso em: 21 jul. 2023.
- ANDRADE, A. P.; JOSÁ NOGUEIRA DE SOUZA, M.; LEANDRO DE ALMEIDA SANTOS, F.; TAYLANA MARINHO MOURA, M. . GEOMORPHOLOGICAL MAPPING OF THE CHORÓ RIVER HYDROGRAPHIC BASIN - CEARÁ, BRAZIL/ MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CHORÓ - CEARÁ, BRASIL. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 1–23, 2021. Disponível em: [//williammorrisdavis.uvanet.br/index.php/revistageomorfologia/article/view/109](http://williammorrisdavis.uvanet.br/index.php/revistageomorfologia/article/view/109). Acesso em: 5 jun. 2023.
- BADIA, A. *et al.* Wildfires in the wildland-urban interface in Catalonia: Vulnerability analysis based on land use and land cover change. **Science of the Total Environment**. v. 673. [S.l.], [s. n.], p. 184-196, 2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719315256?via%3Dihub> Acesso em: 5 jun. 2023.

BARBIER, E. B. *et al.* The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services. Rochester, NY, 2011. **Ecological Monographs**, [S.l.], v. 81, n. 2, p. 169-193, 2011. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=1868308>. Acesso em: 29 jul. 2023.

BARBOSA, I. M. B. R.; NETO, A. G. P.; SILVA, S. R. DA. Mapping of areas at risk of flooding in the hydrographic basin of the Jaboatão River, in Pernambuco, using the method AHP (Analytic Hierarchy Process). **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, SC, v. 10, [s.n.], p. 83-94, 2021. Trabalho apresentado no IX Encontro de Sustentabilidade em Projetos. 10, 2021, Florianópolis - SC. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/228934>. Acesso em: 29 jul. 2023.

BARBOSA, W. C. DE S.; VALLADARES, G. S. Análise da paisagem e do uso e cobertura das terras no nordeste brasileiro, litoral semiárido. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia - MG, v. 32, p. 620–632, 24 jan. 2022. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-48038 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/cdDrhrmp7Jv9sHf7mPZHbgh/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 29 jul. 2023.

BORGES, J. C. A.; BATISTA, L. F. A. Índice de vegetação e temperatura de superfície terrestre: comparativo entre formação de ilhas de calor nos perímetros urbanos de Londrina e Maringá no PR. **Revista Brasileira de Geomática**, Curitiba - PR, v. 8, n. 4, p. 256–274, 28 out. 2020. DOI: 10.3895/rbgeo.v8n4.12478 Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/12478> Acesso em: 29 jul. 2023.

BRAGA, T. M.; DE OLIVEIRA, E. L.; GIVISIEZ, G. H. N. Avaliação de metodologias de mensuração de risco e vulnerabilidade social a desastres naturais associados À mudança climática. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo - SP, v. 20, n. 1, 2006. Disponível em: <http://produtos.seade.gov.br/produtos/spp/index.php?men=res> Acesso em: 29 jul. 2023.

BRASIL. Lei Federal 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 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm Acesso em: 29 jul. 2023.

BRASIL. Lei No 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 jul. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 22 jul. 2023.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm. Acesso em: 25 jan. 2023.

BRASIL. Lei Nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política.

Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 13. jan. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14119.htm Acesso em: 25 jan. 2023.

BRITO, A. P. M. DE; SANTOS, Í. M. DE M.; SILVA, R. M. Variabilidade espaço-temporal da estrutura da paisagem e fragmentação florestal na APA da Serra de Baturité no Ceará.

Ambiente: Gestão e Desenvolvimento, [S. l.], v. 1, n. 1, 2021. DOI:

10.24979/ambiente.v1i1.945. Disponível em:

<https://periodicos.uerr.edu.br/index.php/ambiente/article/view/945..> Acesso em: 5 jun. 2023.

BUNTING, P. *et al.* Global Mangrove Extent Change 1996–2020: Global Mangrove Watch Version 3.0. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 14, n. 15, p. 3657, jan. 2022. DOI:[10.3390/rs14153657](https://doi.org/10.3390/rs14153657) Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/362395553_Global_Mangrove_Extent_Change_1996-2020_Global_Mangrove_Watch_Version_30 Acesso em: 5 jun. 2023.

CAMELO, A. P. S.; SANCHES, K. L. Pagamento por serviços ambientais: um instrumento de mitigação dos efeitos de variação climática e uma ferramenta de gestão para crise hídrica na bacia do alto descoberto. **Nativa**, Sinop - MT, v. 7, n. 5, p. 574–581, 12 set. 2019. DOI: 10.31413/nativa.v7i5.6986 Disponível em:

<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/6986> Acesso em: 5 jun. 2023.

CAMPOS, M.; BOADA, M. Implementation of Eurosite planning methodology for natural protected areas management to a Mexican study case. 1 jan. 2007. [**Boletín de la A.G.E.**], n.º 45, p.419-421, 2007. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/237600473_Implementation_of_Eurosite_planning_methodology_for_natural_protected_areas_management_to_a_Mexican_study_case Acesso em: 5 jun. 2023.

CANADELL, J. G. *et al.* Saturation of the Terrestrial Carbon Sink. **Terrestrial Ecosystems in a Changing World**. Global Change — The IGBP Series. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. [s.n], p. 59–78. DOI:[10.1007/978-3-540-32730-1_6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1_6) Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/226760049_Saturation_of_the_Terrestrial_Carbon_Sink Acesso em: 5 jun. 2023.

CARTOLANO, R. T. *et al.* **Definição de áreas prioritárias para restauração ecológica**. 1ed. Nova Xamatina - MT: Pantanal, 2022.

CARVALHO, A. T. F. BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO: DISCUSSÃO SOBRE OS IMPACTOS DA PRODUÇÃO SOCIAL NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL. **Caderno Prudentino de Geografia**, [S. l.], v. 1, n. 42, p. 140–161, 2020. Disponível em:

<https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/6953>. Acesso em: 5 jun. 2023.

CEARÁ. **Decreto nº 20956, de 18 de set. 1990**. Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental da Serra de Baturité, neste Estado, e adota outras providências. Fortaleza - CE.

1990. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=276819>. Acesso em: 25 jan. 2023.

CEARÁ. Secretaria de Cultura. **Relatório de Diagnóstico Ambiental das Bacias Metropolitanas**: Elaboração do Plano de Segurança Hídrica das Bacias Hidrográficas Estratégicas do Acaraú, Metropolitanas e da Sub-Bacia do Salgado. 2018, Fortaleza: Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Relatorio%20Diagnostico%20Ambiental%20das%20Bacias%20Metropolitanas.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2023.

CEARÁ, Secretaria do Meio Ambiente e Mudança do Clima (Semace). **Autos de Infração e Outras Sanções**. 2022. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/fiscalizacao-ambiental/autos-de-infracao-e-outras-sancoes/>. Acesso em: 22 jul. 2023.

CEARÁ, Instituto de pesquisa e estratégia econômica do Ceará (IPECE). **Ceará em Números**. Secretaria do Planejamento do Ceará. 2019. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/ceara-em-numeros/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

CHANG, H.-S.; SU, Q.; KATAYAMA, T. Research on establishment of the region flood protection standard - a case of watershed of Dajiaxi, Taiwan. *Urban Water Journal*, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 173–182, 16 mar. 2021. DOI <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1864831> Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2020.1864831> Acesso em: 25 jan. 2023.

CHANG, X. *et al.* Scenario simulation of land use and land cover change in mining area. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 12910, 18 jun. 2021. DOI <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92299-5> Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-92299-5#citeas> Acesso em: 25 jan. 2023.

CHAVES, L. C. G. *et al.* Water quality and anthropogenic impact in the watersheds of service reservoirs in the Brazilian semi-arid region. **Revista Ciência Agrônômica**, [S.l.], v. 50, p. 223–233, abr - jun. 2019. ISSN 1806-6690 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/7zK3pkycrgvGSLNFL58cDgj/?format=pdf> Acesso em: 25 jan. 2023.

CHAZDON, R. Regeneração de florestas tropicais. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. **Ciências Naturais**, Belém, PA, v. 7, n. 3, p. 195–218, set - dez. 2012. Disponível em: [http://editora.museu-goeldi.br/bn/artigos/cnv7n3_2012/regeneracao\(chazdon\).pdf](http://editora.museu-goeldi.br/bn/artigos/cnv7n3_2012/regeneracao(chazdon).pdf) Acesso em: 25 jan. 2023.

CHOWDHURY, MD. S.; HAFSA, B. Multi-decadal land cover change analysis over Sundarbans Mangrove Forest of Bangladesh: A GIS and remote sensing based approach. **Global Ecology and Conservation**, [S.l.], v. 37, [s.n], p. e02151, 1 set. 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02151> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989422001536?via%3Dihub> Acesso em: 25 jan. 2023.

CIDREIRA, V. C. DE A. **Impacto do assoreamento sobre o desenvolvimento estrutural do bosque de mangue do rio Tabatinga, Suape, Pernambuco, Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de

Pernambuco, Recife, 2014, p. 1-77. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/18922>. Acesso em: 12 ago. 2023.

CINELLI, M.; COLES, S. R.; KIRWAN, K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, [S.l.], v. 46, [s.n.], p. 138–148, 1 nov. 2014. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14002647?via%3Dihub> Acesso em: 12 ago. 2023.

COFFEY, L.; CLAUDIO, D. In defense of group fuzzy AHP: A comparison of group fuzzy AHP and group AHP with confidence intervals. **Expert Systems with Applications**, [S.l.], v. 178, [s.n.], p. 114970, 15 set. 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114970>

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417421004115?via%3Dihub> Acesso em: 12 ago. 2023.

CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin User Manual. **Technical Report**. [S.l.], [s.v.], [s.n.], [s.p.], 2014. DOI:10.13140/RG.2.1.1219.3524 Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/265031337_Semi-](https://www.researchgate.net/publication/265031337_Semi-Automatic_Classification_Plugin_User_Manual)

[Automatic_Classification_Plugin_User_Manual](https://www.researchgate.net/publication/265031337_Semi-Automatic_Classification_Plugin_User_Manual). Acesso em: 25 jan. 2023.

CORREIA FILHO, W. L. F. *et al.* Impact of urban decadal advance on land use and land cover and surface temperature in the city of Maceió, Brazil. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 87, [s.n.], p. 104026, 1 set. 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104026 Disponível

em:<https://ideas.repec.org/a/eee/lausp/v87y2019ics0264837719300328.html> Acesso em: 25 jan. 2023.

CORREIA, J. N.; OLIVEIRA, V. DE P. S. DE; ARAÚJO, T. M. DE R. Avaliação, Conservação e Recuperação de Nascentes em Bacias Hidrográficas. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 274–290, 27 dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v14n22020p274-290> Disponível em:

<https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/15525> Acesso em: 25 jan. 2023.

CRISPIM, B. CRISPIM.; SOUZA, S. N. Degradação, Impacto Ambiental E Uso Da Terra Em Bacias Hidrográficas: O Contexto Da Bacia Do Pacoti/Ce. **ACTA GEOGRÁFICA**, [S.l.], v. 10, n. 22, p. 17–33, jan-abr 2016. DOI: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v10i22.2578> Disponível em: <https://revista.ufrr.br/actageo/article/view/2578> Acesso em: 25 jan. 2023.

CRUZ, C. L. Z. DA; CRUZ, C. B. M. AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO TEMÁTICA DA COBERTURA E USO DA TERRA REPRESENTADA ATRAVÉS DO MAPBIOMAS NO RIO DE JANEIRO. **GEOgraphia**, [S.l.], v. 23, n. 50, 1 mar. 2021. DOI:

<https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2021.v23i50.a47001> Disponível em:

<https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/47001> Acesso em: 25 jan. 2023.

DA SILVA COSTA, D. F. *et al.* Mapping and Assessment of Landscape's Capacities to Supply Ecosystem Services in the Semi-Arid Coast of Brazil—A Case Study of Galinhos-Guamaré Estuarine System. **Coasts**, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 244–258, set. 2022. DOI

<https://doi.org/10.3390/coasts2030012> Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-964X/2/3/12> Acesso em: 21 jul. 2023.

DAS MAJUMDAR, D.; BISWAS, A. Quantifying land surface temperature change from LISA clusters: An alternative approach to identifying urban land use transformation. **Landscape and Urban Planning**, [S.l.], v. 153, p. 51–65, 1 set. 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.001> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204616300597?via%3Dihub> Acesso em: 21 jul. 2023.

DE ALBAN, J. D. T. *et al.* Improved estimates of mangrove cover and change reveal catastrophic deforestation in Myanmar. [Singapore]. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 3, p. 034034, mar. 2020. Disponível em: [10.1088/1748-9326/ab666d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab666d) Acesso em: 21 jul. 2023.

DE ALMEIDA, F. C.; SILVEIRA, E. M. de O.; ACERBÍ JUNIOR, F. W.; FRANÇA, L. C. de J.; BUENO, I. T.; TERRA, B. J. O. ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA RECUPERAÇÃO FLORESTAL NA BACIA DO RIO DOCE, EM MINAS GERAIS. *Nativa*, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 81–90, 2020. DOI: [10.31413/nativa.v8i1.8130](https://doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8130). Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/8130>. Acesso em: 4 jun. 2023.

DE ARAÚJO, J. C. *et al.* Water Management causes increment of reservoir silting and reduction of water yield in the semiarid State of Ceará, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 121, n.1, p. 104102, 1 jan. 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104102> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981122003881> Acesso em: 4 jun. 2023.

DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [S.l.], v. 51, n. 1, p. 157–170, fev. 2006. DOI: [10.1623/hysj.51.1.157](https://doi.org/10.1623/hysj.51.1.157) Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.51.1.157> Acesso em: 4 jun. 2023.

DE LACERDA, L. D. *et al.* 20-Years Cumulative Impact From Shrimp Farming on Mangroves of Northeast Brazil. **Frontiers in Forests and Global Change**, [S.l.], v. 4, [s.n], [s.p], 2021. DOI <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.653096> Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2021.653096/full> Acesso em: 4 jun. 2023.

DE MOURA NETO, A. *et al.* Changes in land use and cover and their consequences on the spatial distribution of evapotranspiration and climatic elements in southwest Piauí, MATOPIBA. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 120, [s.n], p. 104084, dez. 2022. DOI: [10.1016/j.jsames.2022.104084](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104084) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981122003704?via%3Dihub> Acesso em: 4 jun. 2023.

DE SOUZA PINHEIRO, L. **Riscos e gestão ambiental no estuário do Rio Malcozinhado, Cascavel-CE**. 229 p. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/8711>. Acesso em: 12 ago. 2023.

DENG, Y. *et al.* Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 641, 12 jan. 2018. DOI:10.1038/s41598-017-19088-x Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-19088-x> Acesso em: 12 ago. 2022.

DUARTE, C. M. *et al.* Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? **Frontiers in Marine Science**, [S.l.], v. 4, [s.n.], p. 1 – 20, 2017. DOI <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100> Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2017.00100/full> Acesso em: 12 ago. 2022.

ENSSLIN, L. *et al.* Modelo multicritério de apoio à decisão construtivista no processo de avaliação de fornecedores. **Production**, [S.l.], v. 23, n. 2, p. 402–421, 18 set. 2012. DOI <https://doi.org/10.1590/S0103-65132012005000065> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/hQ5cJtNmzzSJf8hS7GhWGdH/?format=html&lang=pt#> Acesso em: 12 ago. 2022.

FALKENMARK, M.; LUNDQVIST, J. Towards water security: political determination and human adaptation crucial. **Natural Resources Forum**, [S.l.], v. 22, n. 1, p. 37–51, 1998. Disponível em: <https://es.ircwash.org/sites/default/files/210-98TO-14852.pdf> Acesso em: 13 ago. 2022.

FALSARELLA, O.; SILVA, M. L. R. DA; MARIOSA, D. F. O processo de decisão na gestão de recursos hídricos: a contribuição da Internet das Coisas (IOT) e Big Data. **Journal on Innovation and Sustainability RISUS**, [S.l.], v. 13, n. 2, p. 45–58, 15 jun. 2022. DOI <https://doi.org/10.23925/2179-3565.2022v13i2p45-58> Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/risus/article/view/56601> Acesso em: 13 ago. 2022.

FAO. **Global forest resources assessment 2015: how are the world's forests changing?** Second edition ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/29b8ae23-99f9-4a05-b796-9a35d02af29d/content> Acesso em: 13 ago. 2022.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM:LABHID, 2008. p. 812.

FERREIRA, A. C. *et al.* New contributions to mangrove rehabilitation/restoration protocols and practices. **Wetlands Ecol Manage**, [S.l.], v. 31, [s.n.], p. 89 – 114, 2023. DOI <https://doi.org/10.1007/s11273-022-09903-2> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11273-022-09903-2>. Acesso em: 29 jan. 2023.

FERREIRA, P. S.; SILVA, C. A. DA. O método AHP e a Álgebra de Mapas para determinar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Brilhante (Mato Grosso do Sul / Brasil), proposições para a gestão do território. **Confins**. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia, [S.l.], n. 46, p. 10 – 25, 23 jun. 2020. DOI <https://doi.org/10.4000/confins.30897> Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/30897> Acesso em: 29 jan. 2023.

FORMAN, E.; PENIWATI, K. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v. 108, n. 1,

p. 165–169, 1 jul. 1998. Disponível em:
<https://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v108y1998i1p165-169.html> Acesso em: 29 jan. 2023.

FREIRE, L. M.; SOUZA, M. J. N. DE. Geografia E Questão Ambiental No Estudo De Paisagens De Exceção O Exemplo Da Serra De Baturité - Ceará - DOI 10.5216/bgg.v26i2.5230. **Boletim Goiano de Geografia**, [S.l.], v. 26, n. 2, p. 129–150, 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3371/337127145001.pdf> Acesso em: 29 jan. 2023.

FREITAS, E. P. *et al.* Indicadores ambientais para áreas de preservação permanente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 17, p. 443–449, abr. 2013. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/BJgKNP4y3wvG6MVJfgKSDMs/abstract/?lang=pt#> Acesso em: 29 jan. 2023.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Unidades Fitoecológicas do Estado do Ceará**. Ceará: Funceme, 2019. 1 mapa Escala 1:600.000. Disponível em: http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/15-Mapa_CE_Fltoecologico_A2.pdf. Acesso em: 25 fev. 2023.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Tipos Climáticos do Estado do Ceará**. Ceará: Funceme, 2018. 1 mapa Escala 1:600.000. Disponível em: http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/interface/black_gm.phtml?cheafto6hmft0hmakius2h8mg2. Acesso em: 25 fev. 2023.

GALATA, A. W. Analysis of land use/land cover changes and their causes using landsat data in hangar watershed, Abay basin, Ethiopia. **Journal of Sedimentary Environments**, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 415–423, 1 dez. 2020. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/343861450_Analysis_of_land_useland_cover_changes_and_their_causes_using_landsat_data_in_hangar_watershed_Abay_basin_Ethiopia Acesso em: 25 fev. 2023.

GAMEIRO, S. *et al.* Multitemporal Spatial Analysis of Land Use and Land Cover Changes in the Lower Jaguaribe Hydrographic Sub-Basin, Ceará, Northeast Brazil. **Land**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 103, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/1/103> Acesso em: 25 fev. 2023.

GARCIA, J. M. *et al.* Degradação ambiental e qualidade da água em nascentes de rios urbanos. **Sociedade & Natureza**, [S.l.], v. 30, p. 228–254, 25 jul. 2020. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/sn/a/DvNMBqxxQbSvQ4xhtQv36Ts/?format=pdf> Acesso em: 25 fev. 2023.

GARI, Y. *et al.* Quantifying the United Nations' Watercourse Convention Indicators to Inform Equitable Transboundary River Sharing: Application to the Nile River Basin. **Water**, [S.l.], v. 12, n. 9, p. 2499, set. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2499> Acesso em: 25 fev. 2023.

GATTI, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, [S.l.], v. 595, n. 7867, p. 388–393, jul. 2021. Disponível em:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34262208/> Acesso em: 25 fev. 2023.

- GHOSH, A.; MAITI, R. Development of new Ecological Susceptibility Index (ESI) for monitoring ecological risk of river corridor using F-AHP and AHP and its application on the Mayurakshi river of Eastern India. **Ecological Informatics**, [S.l.], v. 63, p. 101318, 1 jul. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954121001096?via%3Dihub> Acesso em: 25 fev. 2023.
- GILANI, H. *et al.* Evaluating mangrove conservation and sustainability through spatiotemporal (1990–2020) mangrove cover change analysis in Pakistan. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [S.l.], v. 249, p. 107128, fev. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771420308593?via%3Dihub> Acesso em: 25 fev. 2023.
- GJORUP, A. F. *et al.* Análise de procedimentos para seleção de áreas prioritárias em programas de pagamento por serviços ambientais hídricos. **Revista Ambiente & Água**, [S.l.], v. 11, p. 225–238, mar. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/ByvgcDFGtZtcpvXYkP8ZpZf/abstract/?lang=pt> Acesso em: 25 fev. 2023.
- GODOY, M. D. P.; MEIRELES, A. J. DE A.; LACERDA, L. D. DE. Mangrove Response to Land Use Change in Estuaries along the Semiarid Coast of Ceará, Brazil. **Journal of Coastal Research**, [S.l.], v. 34, n. 3, p. 524–533, maio 2018. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/60278/1/2018_art_mdpgodoy.pdf Acesso em: 25 fev. 2023.
- GONÇALVES, J. A. C.; VIEIRA, E. M. Aquífero Barreiras: Alto Potencial Hídrico Subterrâneo Na Porção Do Baixo Rio Doce No Estado Espírito Santo. **Águas Subterrâneas**, 2018. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29371> Acesso em: 25 fev. 2023.
- GOSSWEILER, B. *et al.* Impact of Land Use Change on Non-Point Source Pollution in a Semi-Arid Catchment under Rapid Urbanisation in Bolivia. **Water**, [S.l.], v. 13, n. 4, p. 410, jan. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/410> Acesso em: 25 fev. 2023.
- GREY, D.; SADOFF, C. W. Sink or Swim? Water security for growth and development. **Water Policy**, [S.l.], v. 9, n. 6, p. 545–571, 1 dez. 2007. Disponível em: <https://iwaponline.com/wp/article-abstract/9/6/545/31241/Sink-or-Swim-Water-security-for-growth-and?redirectedFrom=fulltext> Acesso em: 25 fev. 2023.
- HAJKOWICZ, S.; COLLINS, K. A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. **Water Resources Management**, [S.l.], v. 21, n. 9, p. 1553–1566, 1 set. 2007. Disponível em: <https://www.napawatersheds.org/img/managed/Document/3405/Hajkowicz2007%20AReviewOfMultipleCriteriaAnalysis4WaterResour.pdf> Acesso em: 25 fev. 2023.
- HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A restauração de ecossistemas e a produção de água. **Hoehnea**, [S.l.], v. 44, p. 315–327, set. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hoehnea/a/94FLKd8kSgdzCHNpVsjfMJQ/?lang=pt> Acesso em: 25 fev. 2023.

HU, X. *et al.* Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection – A case of Weifang City, China. **Ecological Indicators**, [S.l.], v. 125, p. 107464, 1 jun. 2021.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21001291?via%3Dihub> Acesso em: 25 fev. 2023.

HUBAU, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**, [S.l.], v. 579, n. 7797, p. 80–87, mar. 2020. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/339927383_Asynchronous_Carbon_Sink_Saturation_in_African_and_Amazonian_Tropical_Forests Acesso em: 25 fev. 2023.

IKEMATSU, P. *et al.* Aspectos Técnicos Para Priorização De Recursos Em Recuperação E Conservação De Nascentes. **Águas Subterrâneas**, 2016. Disponível em:

<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28740> Acesso em: 25 fev. 2023.

INFOSANBA. **Informações Contextualizadas sobre Saneamento no Brasil**. 2020

Disponível em: <https://infosanbas.org.br/>. Acesso em: 22 jul. 2023.

IPCC, 2022: Mudanças Climáticas 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade.

Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [H.-O. Pörtner, DC Roberts, M. Tignor, ES Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. **Cambridge University Press**. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, EUA, 3056 pp., doi: 10.1017/9781009325844 . Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 22 jul. 2023.

JAMES, G. K. *et al.* Social valuation of mangroves in the Niger Delta region of Nigeria.

International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, [S.l.], v. 9, n. 4, p. 311–323, 1 dez. 2013. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21513732.2013.842611> Acesso em: 22 jul. 2023.

JIANG, J.; TIAN, G. Analysis of the impact of Land use/Land cover change on Land Surface Temperature with Remote Sensing. **Procedia Environmental Sciences**, International

Conference on Ecological Informatics and Ecosystem Conservation (ISEIS 2010). [S.l.], v. 2, p. 571–575, 1 jan. 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029610000952?via%3Dihub> Acesso em: 22 jul. 2023.

KAUFFMAN, J. B. *et al.* Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves. **Ecology and Evolution**, [S.l.], v. 8, n. 11, p. 5530–5540, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ece3.4079> Acesso em: 22 jul. 2023.

KAUFFMAN, J. B.; DONATO, D. Array - CIFOR Knowledge. **CIFOR**, 4 mar. 2012. Bogor, Indonesia. Disponível em: [https://www.cifor-](https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/WPapers/WP86CIFOR.pdf)

[icraf.org/publications/pdf_files/WPapers/WP86CIFOR.pdf](https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/WPapers/WP86CIFOR.pdf) Acesso em: 22 jul. 2023.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, [S.l.], v. 33, n. 1, p. 159–174, mar. 1977. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/843571/> Acesso em: 22 jul. 2023.

LEE, J.; LI, S. Extending Moran's Index for Measuring Spatiotemporal Clustering of Geographic Events. **Geographical Analysis**, [S.l.], v. 49, n. 1, p. 36–57, jan. 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gean.12106> Acesso em: 22 jul. 2023.

LEONELLI, S. **Pesquisa Científica na Era do Big Data**: cinco maneiras que mostram como o Big Data prejudica a ciência, e como podemos salvá-la. 2022. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/livro/pesquisa-cientifica-na-era-do-big-data-cinco-maneiras-que-mostram-como-o-big-data-prejudica>. Acesso em: 30 jan. 2023.

LIAO, W.; RIGDEN, A. J.; LI, D. Attribution of Local Temperature Response to Deforestation. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, [S.l.], v. 123, n. 5, p. 1572–1587, 2018. Disponível em: https://sites.bu.edu/efm/files/2018/05/Liao_et_al-2018-Journal_of_Geophysical_Research3A_Biogeosciences.pdf Acesso em: 22 jul. 2023.

LIMA, M. da S. de. Recursos hídricos e vulnerabilidade ambiental: o caso da bacia hidrográfica do Rio Acaraú / Water resources and environmental vulnerability: the case of the Acaraú hydrographic basin. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, [S.l.], v. 3, n. 3, p. 2062–2070, 2020. DOI: 10.34188/bjaerv3n3-118. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/15266>. Acesso em: 2 jul. 2023.

LOPES, R. C.; SILVA, R. N. F. Aplicação Das Lógicas Booleana E Fuzzy Na Determinação De Áreas Aptas Para A Implantação De Aterro Sanitário: **Geosciences = Geociências**, [S.l.], v. 41, n. 1, p. 287–297, 27 maio 2022. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/16277> Acesso em: 22 jul. 2023.

LUNSTRUM, A.; CHEN, L. Soil carbon stocks and accumulation in young mangrove forests. **Soil Biology and Biochemistry**, [S.l.], v. 75, p. 223–232, 1 ago. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003807171400128X?via%3Dihub> Acesso em: 22 jul. 2023.

LUZARDO, A. J. R.; CASTAÑEDA FILHO, R. M.; RUBIM, I. B. ANÁLISE ESPACIAL EXPLORATÓRIA COM O EMPREGO DO ÍNDICE DE MORAN. **GEOgraphia**, [S.l.], v. 19, n. 40, p. 161 - 179, 5 out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2017.v19i40.a13807> Disponível em: <https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/13807> Acesso em: 22 jul. 2023.

MACREADIE, P. I. *et al.* The future of Blue Carbon science. **Nature Communications**, [S.l.], v. 10, n. 1, p. 3998, 5 set. 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-11693-w> Acesso em: 22 jul. 2023.

MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progresso no Planejamento**, [S.l.], v. 61, n.1, p. 1-68, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/progress-in-planning/vol/62/issue/1>. Acesso em: 30 jan. 2023.

- MALLUPATTU, P. K.; REDDY, J. R. S. Analysis of Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing Data and GIS at an Urban Area, Tirupati, India. **The Scientific World Journal**, [S.l.], v. 15, p. e268623, 28 maio 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2013/268623> Acesso em: 22 jul. 2023.
- MANSOURMOGHADDAM, M. *et al.* Investigation and Prediction of the Land Use/Land Cover (LU/LC) and Land Surface Temperature (LST) Changes for Mashhad City in Iran during 1990–2030. **Atmosphere**, [S.l.], v. 14, n. 4, p. 741, abr. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/4/741> Acesso em: 22 jul. 2023.
- MANTIS, A. B.; VAZ, J. A. Mapeamento De Áreas De Risco De Alagamento Do Município De Guarujá – Sp Utilizando Método De Análise Hierárquica. **LEOPOLDIANUM**, [S.l.], v. 45, n. 126, p. 18–18, 5 set. 2019. Disponível em: <https://periodicos.unisantos.br/leopoldianum/article/view/910> Acesso em: 22 jul. 2023.
- MAPBIOMAS. Mapbiomas Brasil. **Ocupação de APPs às margens de rios e córregos dobrou entre 1985 e 2020**. 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/ocupacao-de-apps-as-margens-de-rios-e-corregos--dobrou-entre-1985-e-2020-1>. Acesso em: 25 jan. 2023.
- MARTINS, V. B. **Metodologia Baseada Em Sistemas De Informação Geográfica E Análise Multicritério Para A Seleção De Áreas Para A Construção De Um Repositório Para O Combustível Nuclear**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufrj.br/handle/ufrj/7057> Acesso em: 22 jul. 2023.
- MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A. **Climate change 2021: the physical science basis : summary for policymakers : working group I contribution to the sixth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> Acesso em: 22 jul. 2023.
- MEIRELES, A. J. D. A. *et al.* Geomorphology and ecological services as the foundations of the integrated coastal plain management in icapuí, state of ceara, brazilian northeast. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 210–231, 14 ago. 2020. Disponível em: <https://williammorrisdavis.uvanet.br/index.php/revistageomorfologia/article/view/33> Acesso em: 22 jul. 2023.
- MOURA, P. **Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do complexo industrial e portuário do Pecém, Estado do Ceará**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/15023> Acesso em: 22 jul. 2023.
- NASCIMENTO, F. R. DO; SOUZA, M. J. N. DE; CRUZ, M. L. B. DA. Diagnóstico socioeconômico da área de proteção ambiental da serra de baturité – ceará. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, [S.l.], v. 20, n. 0, 2010. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/20602> Acesso em: 22 jul. 2023.
- NEGASSA, M. D.; MALLIE, D. T.; GEMEDA, D. O. Forest cover change detection using Geographic Information Systems and remote sensing techniques: a spatio-temporal study on

Komto Protected forest priority area, East Wollega Zone, Ethiopia. **Environmental Systems Research**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 1, 21 jan. 2020. Disponível em: <https://environmentalsystemsresearch.springeropen.com/articles/10.1186/s40068-020-0163-z> Acesso em: 22 jul. 2023.

NOBRE, C. A. Possible climatic impacts of tropical de forestation. **Climatic Change**, [S.l.], v. 19, n. 1, p. 177–196, 1 set. 1991. Disponível em: https://www.academia.edu/59485354/Possible_climatic_impacts_of_tropical_deforestation Acesso em: 29 jan. 2023.

OLÍMPIO, J. L. S.; ZANELLA, M. E.; SANTOS, J. DE O. Avaliação Da Vulnerabilidade Aos Perigos Naturais: O Caso Do Estado Do Ceará, Brasil. **Revista da Anpege**, [S.l.], v. 13, n. 20, p. 53–82, 2017. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/6900> Acesso em: 22 jul. 2023.

OLIVEIRA, A. A. A. DE *et al.* Métodos Multicritérios Para Seleção De Áreas Destinadas A Aterros Sanitários. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. Investigación, desarrollo y práctica. [S.l.], v. 14, n. 1, p. 53–82, 2021. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/71086>. Acesso em: 29 jan. 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. G. D. *et al.* Space-temporal detection of environmental changes in the Brazilian semiarid through Google Earth Engine and GIS. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 127, p. 104403, jul. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981123002146?via%3Dihub> Acesso em: 22 jul. 2023.

OMENO, M. O. *et al.* Analysis of the Impact of Land-Use/Land-Cover Change on Land-Surface Temperature in the Villages within the Luki Biosphere Reserve. **Sustainability**, [S.l.], v. 13, n. 20, p. 11242, jan. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11242> Acesso em: 22 jul. 2023.

PELMEZ, Z. Mining big data for sustainable water management. **HRCAK**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 169–178, 10 abr. 2020. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/clanak/343886> Acesso em: 22 jul. 2023.

PEREIRA, A. Q.; ABREU, L. M. GESTÃO DE ÁREAS URBANO-LITORÂNEAS E OS COMPLEXOS TURÍSTICOS E IMOBILIÁRIOS NO NORDESTE DO BRASIL: MANAGEMENT OF URBAN-COASTAL AREAS AND THE REAL ESTATE TOURISTIC COMPLEXES IN THE BRAZILIAN NORTHEAST. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 42, n. 01, 2022. DOI: 10.5216/bgg.v42.73432. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/73432>. Acesso em: 3 jul. 2023.

PEREIRA, L. F.; GUIMARÃES, R. M. F. Mapeando usos/coberturas da terra com semi-automatic classification plugin: quais dados, classificador e estratégia amostral? **Nativa**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 70–76, 1 fev. 2019. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/6845> Acesso em: 22 jul. 2023.

PINHEIRO, L. DE S.; MORAIS, J. O. DE. Interferências de barramentos no regime hidrológico do estuário do rio Catú-Ceará-Nordeste do Brasil. **Sociedade & Natureza**, [S.l.],

v. 22, p. 237–250, ago. 2010. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/sn/a/GKqY5NcP3XCQbqQCW4CmdSf/> Acesso em: 22 jul. 2023.

PINHEIRO, M. I. T. **Segurança Da Água Em Bacias Hidrográficas: Formulação De Um Modelo Institucional**. 2015. 233 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/315496491_SEGURANCA_DA_AGUA_EM_BACIAS_HIDROGRAFICAS_FORMULACAO_DE_UM_MODELO_INSTITUCIONAL Acesso em: 22 jul. 2023.

PINHEIRO, Rosângela Maria Paixão. **Sub-bacias hidrográficas do Alto Jaguaribe (Tauá-CE): vulnerabilidades ante a incidência de degradação / desertificação**. 2003. 193 f. : Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa Regional em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Fortaleza-CE, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/16320> Acesso em: 22 jul. 2023.

QUEIROZ, L. *et al.* Shrimp aquaculture in the federal state of Ceará, 1970–2012: Trends after mangrove forest privatization in Brazil. **Ocean & Coastal Management**, [S.l.], v. 73, p. 54–62, 1 mar. 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.11.009> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569112003225?via%3Dihub> Acesso em: 29 jan. 2023.

QUEIROZ, PEDRO HENRIQUE BALDUINO DE. **EVOLUÇÃO MORFOLOGICA DE BARRAS E ILHAS FLUVIAIS NO BAIXO CURSO DO RIO JAGUARIBE DIANTE DA INSERÇÃO DA BARRAGEM DO CASTANHÃO, CEARÁ-BRASIL**. 2018. 378 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual do Ceará. 2018. Disponível em: <http://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=84123> Acesso em: 2 de julho de 2023.

REYGADAS, Y.; JENSEN, J. L. R.; MOISEN, G. G. Forest Degradation Assessment Based on Trend Analysis of MODIS-Leaf Area Index: A Case Study in Mexico. **Remote Sensing**, [S.l.], v. 11, n. 21, p. 2503, jan. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/21/2503> Acesso em: 22 jul. 2023.

RIBEIRO NETO, A. *et al.* Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**, [S.l.], v. 8, n. 12, p. 1103–1127, 1 nov. 2016. Disponível em:
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=71810> Acesso em: 22 jul. 2023.

ROSS, J. L. S. ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NATURAIS ANTROPIZADOS. **Revista do Departamento de Geografia**, [S.l.], v. 8, p. 63–74, 1994. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/47327> Acesso em: 22 jul. 2023.

RUDEL, T. K. *et al.* Forest transitions: towards a global understanding of land use change. **Global Environmental Change**, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 23–31, 1 abr. 2005. DOI <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.11.001> Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378004000809?via%3Dihub> Acesso em: 30 jan. 2023.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **Aestimum**. [S.l.], v. 48, n. 1, p. 9–26, 5 set. 1994. DOI: <https://doi.org/10.13128/Aestimum-7138> Disponível em: <https://oaj.fupress.net/index.php/ceset/article/view/6254> Acesso em: 30 jan. 2023.

SAATY, T. L. Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process. **Behaviormetrica**. [S.l.], v. 18, n. 29, p. 1-8. 1991. DOI https://doi.org/10.2333/bhmk.18.29_1. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.2333/bhmk.18.29_1. Acesso em: 30 jan. 2023.

SAFARRAD, T. *et al.* Tourism Effect on the Spatiotemporal Pattern of Land Surface Temperature (LST): Babolsar and Fereydonkenar Cities (Cases Study in Iran). **Land**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. 945, set. 2021. DOI <https://doi.org/10.3390/land10090945> Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/10/9/945> Acesso em: 29 jan. 2023.

SALA, O. E. *et al.* Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. **Science**, [S. l.], v. 287, n. 5459, p. 1770–1774, 10 mar. 2000. DOI: 10.1126/science.287.5459.1770 Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.287.5459.1770> Acesso em: 29 jan. 2023.

SALDANHA, R. DE F.; BARCELLOS, C.; PEDROSO, M. DE M. Ciência de dados e big data: o que isso significa para estudos populacionais e da saúde? **Cadernos Saúde Coletiva**, [S. l.], v. 29, p. 51–58, 26 nov. 2021. DOI <https://doi.org/10.1590/1414-462X202199010305> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cadsc/a/JWLSWTVvPcKkkbB6p5VPVTL/> Acesso em: 29 jan. 2023.

SALEH, S. K. *et al.* Effect of landscape pattern changes and environmental indices on land surface temperature in a fragile ecosystem in southeastern Iran. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 30, n. 12, p. 34037–34053, 1 mar. 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-24602-4 Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-24602-4> Acesso em: 29 jan. 2023.

SALOMÃO, R. P.; BRIENZA JÚNIOR, S.; ROSA, N. A. Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. **Revista Árvore**, [S. l.], v. 38, n. 1, 2014. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100001> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/MRtjXRXX84cfQrZpBG3YPvk/?lang=pt>. Acesso em: 29 jan. 2023.

SAURI PUJOL, D.; BOADA JUNCA, M. **El cambio global**. Barcelona (ES): [s.n.]. 2002.

SAYÃO, V. M. *et al.* Land use/land cover changes and bare soil surface temperature monitoring in southeast Brazil. **Geoderma Regional**, [S. l.], v. 22, p. e00313, 1 set. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00313> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352009420300626?via%3Dihub> Acesso em: 22 jul. 2023.

SHUKLA, J.; NOBRE, C.; SELLERS, P. Amazon Deforestation and Climate Change| **Science**, [S. l.], v.247, n. 4948, p. 1322 - 1325, 1990. DOI: 10.1126/ciência.247.4948.1322 Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.247.4948.1322> Acesso em: 12 jun. 2023.

SILVA, J. V. M. da; MOURA FÉ, M. M. de; COSTA, C. T. F. da . Análise ambiental integrada das nascentes de Crato – CE: fundamentos para o desenvolvimento sustentável. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 49, n. 3, p. e123641, 2023. DOI: 10.22456/1807-9806.123641. Disponível em:

<https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/123641>. Acesso em: 12 jun. 2023.

SILVA, M. B. F. A. **Índice de remoção de barragens cearenses (IREB) sob um enfoque multicritério**. 2012. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia - , Universidade Federal do Ceará, 2012. Disponível em:

https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3876/1/2012_tese_mbfasilva.pdf Acesso em: 25 jan. 2023.

SOARES, Alexandra Fátima Saraiva; SOUZA E SOUZA, Luís Paulo. Contaminação das águas de abastecimento público por poluentes emergentes e o direito à saúde. **Revista de Direito Sanitário**, São Paulo, Brasil, v. 20, n. 2, p. 100–133, 2020. DOI: 10.11606/issn.2316-9044.v20i2p100-133. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdisan/article/view/169658..> Acesso em: 11 jun. 2023.

SOARES, L. S. *et al.* Analysis of Spatiotemporal Changes in Land Use and Land Cover in Sub-Watersheds of the Lower Itapecuru River in the State of Maranhão, Brazil. **Geography Department University of São Paulo**, [S. l.], v. 34, p. 55, 22 dez. 2017. DOI:

<https://doi.org/10.11606/rdg.v34i0.133551> Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/133551> Acesso em: 25 jan. 2023.

SOARES, M. O. *et al.* Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 267–278, 1 jul. 2021. DOI: 10.1016/j.pecon.2021.06.001 Disponível em: <https://www.perspectecolconserv.com/en-challenges-perspectives-for-brazilian-semi-arid-articulo-S2530064421000523> Acesso em: 25 jan. 2023.

SOUZA, A. C. D.; CORSO, L. L. Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do Fuzzy – Processo Analítico Hierárquico. **Scientia cum Industria**. [S. l.], v. 8, n. 2, p. 198-205, 2020. DOI:10.18226/23185279.v8iss2p198 Disponível em: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/9163/pdf> Acesso em: 25 jan. 2023.

SOUZA, C. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 17, [s.p], 25 ago. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735> Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2735> Acesso em: 25 jan. 2023.

SOUZA, V. A. S. de; ROTUNNO FILHO, O. C.; RODRIGUEZ, D. A.; MOREIRA, D. M.; RUDKE, A. P.; ANDRADE, C. D. Dinâmica da conversão de floresta e tendências climáticas na bacia do rio Madeira. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 32, n. 4, p. 2007–2034, 2022. DOI: 10.5902/1980509865211. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/65211>. Acesso em: 10 jun. 2023.

SPRÖL, C.; ROSS, J. L. S. Comparative analysis of environmental fragility by applying three models. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 39–49, 17 jun. 2004. DOI:

<https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2004.123868> Disponível em:
<https://revistas.usp.br/geousp/article/view/123868> Acesso em: 25 jan. 2023.

TEDESCO, A. M.; OLIVEIRA, G. A.; TROJAN, F. Avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas por meio dos métodos AHP e TOPSIS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S. l.], v. 26, p. 401–407, 2 jul. 2021. DOI <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190322> Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/esa/a/XnLJNmdCCTdVpNJT8KzMGQK/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 25 jan. 2023.

THAKUR, S. *et al.* Assessment of changes in land use, land cover, and land surface temperature in the mangrove forest of Sundarbans, northeast coast of India. **Environment, Development and Sustainability**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 1917–1943, fev. 2021. Disponível em: https://ideas.repec.org/a/spr/endesu/v23y2021i2d10.1007_s10668-020-00656-7.html Acesso em: 25 jan. 2023.

THIERS, P. R. L.; MEIRELES, A. J. A.; SANTOS, J. DE O. **Manguezais na costa oeste cearense**: preservação permeada de meias verdades. *In*: Thiers, Paulo Roberto Lopes. (org.). (Estudos da Pós-Graduação). Fortaleza, Ce: Imprensa Universitária, 2016. ISBN: 978-85-7485-245-4 Disponível em:
https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/19468/3/2016_liv_prwthiersmanguezaisnacosta.....pdf Acesso em: 25 jan. 2023.

TUCCI, C.; CHAGAS, M. Segurança hídrica: conceitos e estratégias para Minas Gerais. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 0–0, 2017. DOI 10.21168/reg.v14e12 Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/198/802534ee73e9bcb48c662546a9f2f9e3_fbb8585ef27dacdc1075b1e435cb19e3.pdf Acesso em: 25 jan. 2023.

TURNER II, B. L.; LAMBIM, E. F.; REENBERG, A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. **PNAS**. [S. l.], v. 105, n. 7, p. 20690–20695, 2007. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0704119104>. Acesso em: 25 jan. 2023.

VAEZA, R. F. *et al.* Uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica urbana a partir de imagens orbitais de alta resolução. **Floresta e Ambiente**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 23–29, 2010. DOI <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2011.003> Disponível em:
<https://www.floram.org/article/doi/10.4322/floram.2011.003> Acesso em: 7 maio 2023.

VALENTE, R. A.; PETEAN, F. C. DE S.; VETTORAZZI, C. A. MULTICRITERIA DECISION ANALYSIS FOR PRIORITIZING AREAS FOR FOREST RESTORATION. **CERNE**, [S. l.], v. 23, p. 53–60, mar. 2017. DOI <https://doi.org/10.1590/01047760201723012258> Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/cerne/a/6pfPGX73h3Xnr7DZ4Z7Y6FJ/?lang=en> Acesso em: 7 maio 2023.

VETTORAZZI, C. A.; VALENTE, R. A. Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources. **Ecological Engineering**, [S. l.], v. 94, p. 255–267, 1 set. 2016. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.05.069 Disponível em:
<https://repositorio.usp.br/item/002765182> Acesso em: 7 maio 2023.

VIEIRA, P.; STUDART, T. Proposta Metodológica para o Desenvolvimento de um Índice de Sustentabilidade Hidro- Ambiental de Áreas Serranas no Semiárido Brasileiro - Estudo de Caso: Maciço de Baturité, Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 125–136, 2009. DOI:10.21168/rbrh.v14n4.p125-136 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315664531_Proposta_Metodologica_para_o_Desenvolvimento_de_um_Indice_de_Sustentabilidade_Hidro-Ambiental_de_Areas_Serranas_no_Semiarido_Brasileiro_-_Estudo_de_Caso_Macico_de_Baturite_Ceara Acesso em: 7 maio 2023.

YAO, K. *et al.* Spatiotemporal changes of eco-environmental quality based on remote sensing-based ecological index in the Hotan Oasis, Xinjiang. **Journal of Arid Land**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 262–283, 1 mar. 2022. <https://doi.org/10.1007/s40333-022-0011-2> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40333-022-0011-2#citeas> Acesso em: 7 maio 2023.

ZANATA, J. M. *et al.* ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE DA MICROBACIA RIBEIRÃO BONITO, APOIADA EM TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO. **REVISTA GEONORTE**, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 1262–1272, 2012. Disponível em: [//www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2185](http://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2185). Acesso em: 7 jun. 2023.

ZAQUEO, A. N. S.; QUISSINDO, I. A. B. Taxas de Desflorestação vs Emissão de Dióxido de Carbono no Município do Luau (Moxico-Angola) entre 2008 a 2017. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**. [S.l.], v.2, n.3, p.31-44. Disponível em: <https://reativambiental.com.br/?p=2104>. Acesso em: 29 jan. 2023

ZEBENDE, J. V.; WECKMÜLLER, R.; VICENS, R. S. Desempenho de descritores de vegetação na classificação de trajetórias evolutivas de floresta pelo algoritmo Landtrendr | Galoá Proceedings. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019, Santos. **Anais [...]**. São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/desempenho-de-descritores-de-vegetacao-na-classificacao-de-trajetorias-evolutivas-de-floresta-pelo-algoritmo-landtrendr->. Acesso em: 25 jan. 2023.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO APLICADO AOS ESPECIALISTAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

AUTORA: LALDIANE DE SOUSA PINHEIRO
ORIENTADOR: PROF. ANTONIO JEOVAH MEIRELES

A presente consulta faz parte da tese de doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente da UFC. A pesquisa tem como objetivo mapear as áreas estratégicas e prioritárias para ações de conservação/proteção na Bacia Hidrográfica do rio Choró, identificando as variáveis que mais contribuem com a qualidade dos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos.

O método é baseado na atribuição de pesos conforme escala fundamental de comparação pareada (Saaty, 1994).

1. INSTRUÇÕES PARA COMPARAÇÃO PAREADA DOS CRITÉRIOS

- I. Na comparação dos pares de critérios deve-se utilizar os valores da escala apresentada na Tabela 1.

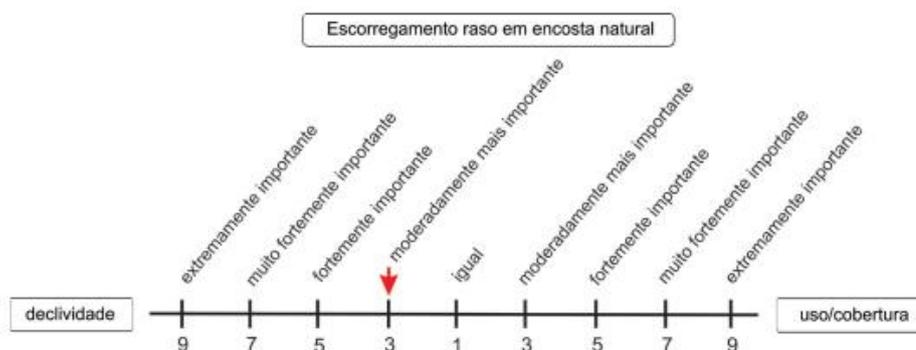
Tabela 1 - Escala fundamental para comparação pareada (Saaty, 1994).

GRAU DE IMPORTÂNCIA	
1	Igual importância: os dois critérios contribuem de forma idêntica
3	Moderadamente mais importante: um critério é um pouco mais importante do que o outro.
5	fortemente importante: um dos critérios é claramente mais importante do que o outro.
7	Fortemente mais importante: um dos critérios é predominantemente mais importante do que o outro.
9	Extremamente mais importante: um dos critérios, sem dúvidas, é absolutamente predominante para o objetivo.

- II. Marque apenas com um X em cada linha;

III. Em caso de dúvida na comparação de algum critério, pode deixar em branco.

Exemplo de julgamento:



Análise: Conforme julgamento declividade é moderadamente mais importante que uso/cobertura para escorregamento em enconsta.

2. ANÁLISE

	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
Uso e Ocupação do Solo										Proximidade da Drenagem
Uso e Ocupação do Solo										Proximidade das Nascentes
Uso e Ocupação do Solo										Litologia dos Aquíferos (recarga)
Uso e Ocupação do Solo										Declividade
Proximidade da Drenagem										Proximidade das Nascentes
Proximidade da Drenagem										Litologia dos Aquíferos (recarga)
Proximidade da Drenagem										Declividade
Proximidade das Nascentes										Litologia dos Aquíferos (recarga)
Proximidade das Nascentes										Declividade
Litologia dos Aquíferos (recarga)										Declividade

Em relação à seleção de áreas prioritárias quanto a vulnerabilidade dos recursos hídricos, julgue os critérios a seguir.