



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE – CCBS**  
**DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA – DEOLI**

**KALYNNE MARIA DE OLIVEIRA CARDOSO**

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO ITAPECURU, MARANHÃO, BRASIL.**

**SÃO LUIS – MA**

**2024**

**KALYNNE MARIA DE OLIVEIRA CARDOSO**

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO ITAPECURU, MARANHÃO, BRASIL.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal do Maranhão, como  
requisito para obtenção de título de bacharel  
em Oceanografia.

**Orientador:** Prof. Dr. Antonio Carlos Leal de  
Castro

**Coorientador:** Me. Brunno Jansen Franco

**SÃO LUIS – MA**

**2024**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Cardoso, Kalyne Maria de Oliveira.

AValiação da Dinâmica da Paisagem da Bacia Hidrográfica  
do Rio Itapecuru, Maranhão, Brasil / Kalyne Maria de  
Oliveira Cardoso. - 2024.

38 f.

Corientador(a) 1: Brunno Jansen Franco.

Orientador(a): Antonio Carlos Leal de Castro.

Curso de Oceanografia, Universidade Federal do  
Maranhão, São Luís, 2024.

1. Urbanização. 2. Sensoriamento Remoto. 3.  
Modelagem Espacial. 4. . 5. . I. Castro, Antonio Carlos  
Leal de. II. Franco, Brunno Jansen. III. Título.

**KALYNNE MARIA DE OLIVEIRA CARDOSO**

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO ITAPECURU, MARANHÃO, BRASIL.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal do Maranhão, como  
requisito para obtenção de título de bacharel  
em Oceanografia.

**Orientador:** Prof. Dr. Antonio Carlos Leal de  
Castro

**Coorientador:** Me. Brunno Jansen Franco

Aprovado em 06 de setembro de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Antonio Carlos Leal de Castro

---

Prof. Dr. Denílson da Silva Bezerra

---

Prof. Dr. Leonardo Silva Soares

A Deus, pai misericordioso.

Aos meus pais, pelo incentivo e valores ensinados

À minha irmã, por tanto apoio e suporte.

A Nick, Belinha e Dara por serem meu ponto de paz.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho e me guiar em cada passo desta jornada.

Aos meus queridos pais, Celso Augusto Cardoso e Maria Eliedima Lima de Oliveira Cardoso, por serem meu alicerce e por todos os sacrifícios realizados em prol da minha educação e formação profissional. Sou eternamente grata por todo o incentivo, força, amizade e exemplo de caráter e resiliência que me proporcionaram ao longo da vida.

À minha irmã, Kalyenne Cardoso, pelo amor, companheirismo e suporte dedicados em toda essa trajetória. Nossa parceria tem sido uma fonte de inspiração e motivação, e sou grata por cada momento compartilhado, que tornou este processo ainda mais especial.

Aos meus padrinhos, Estelma Cardoso e Nark Swellves, pelo cuidado e apoio incondicional.

Ao professor Antônio Carlos, pelas orientações, compreensão, dedicação e valiosa contribuição acadêmica durante este percurso.

Ao meu amigo Brunno Franco, que foi fundamental para a realização deste trabalho. Sou imensamente grata pelas orientações que ele me ofereceu e pela atenção dedicada, pois sem seu apoio, incentivo e colaboração, este projeto não teria sido possível.

Ao meu amigo Alef Fontinele, que não mediu esforços para me auxiliar nesta caminhada, sempre acreditando no meu potencial e me incentivando.

Aos professores da banca examinadora, pela valiosa ajuda e avaliação deste trabalho.

Aos meus amigos Mônica Padilha, Marcelly Carvalho, Karla Guterres, Michelly Moreira, Karolina Rocha, Thamires Leão, André Tocantins, Ithalo Magalhães, Daniel Pereira e Lucas Souza que me apoiaram constantemente. Agradeço por cada palavra de incentivo, por estarem presentes em momentos difíceis e por fazerem parte dessa jornada, tornando-a mais leve e significativa. A amizade de vocês foi uma fonte de força e motivação que sempre me impulsionou a seguir em frente.

Ao meu companheiro, Leandro Santos, que, embora tenha chegado e me acompanhado na minha fase de conclusão dessa trajetória, nunca deixou de me incentivar e sempre demonstrou companheirismo e fé em mim.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Sem vocês, nada disso seria possível.

*"O mar não é um obstáculo, mas um caminho."*

*- Amyr Klink*

## RESUMO

O rápido crescimento econômico e demográfico está acelerando a urbanização e alterando significativamente o uso da terra na bacia hidrográfica do rio Itapecuru. Estudos apontam que a urbanização é um dos principais fatores impulsionadores da perda de áreas agrícolas e espaços naturais, com consequências sérias para a ecologia local. O presente estudo utilizou técnicas avançadas de sensoriamento remoto, como imagens de satélite e dados do MapBiomas, para analisar mudanças no uso e cobertura do solo ao longo de duas décadas, além de realizar uma modelagem de predição para o ano de 2030, utilizando o plugin MOLUSCE no QGIS, onde foi possível projetar cenários de mudança na paisagem. Para validação desse método utilizou-se o índice Kappa para garantir precisão nas previsões. A análise de uso da terra identificou impactos ambientais adversos, como fragmentação florestal e degradação da qualidade da água, resultantes da expansão desordenada e intensificação das atividades agropecuárias na região. Esses resultados destacam a necessidade de estratégias sustentáveis para mitigar os efeitos negativos sobre os ecossistemas locais. A modelagem revelou padrões significantes de transição espaço-temporal na previsão das mudanças futuras até 2030. Desse modo tais padrões de mudança alertam para a necessidade urgente de estratégias sustentáveis que minimizem impactos negativos nos ecossistemas locais.

Palavras-chave: Urbanização, Sensoriamento remoto, Modelagem espacial.



## ABSTRACT

The rapid economic and demographic growth is accelerating urbanization and significantly transforming land use patterns in the Itapecuru River watershed. Research indicates that urbanization is a primary driver of agricultural land and natural space loss, leading to severe ecological consequences. This study employed advanced remote sensing methodologies, including satellite imagery and MapBiomas data, to systematically analyze land use and land cover changes over two decades. Additionally, predictive modeling for the year 2030 was conducted using the MOLUSCE plugin in QGIS, facilitating the projection of potential landscape change scenarios. The Kappa index was utilized for method validation to ensure the precision of the forecasts. The land use analysis revealed adverse environmental impacts, such as forest fragmentation and water quality degradation, attributable to unregulated urban expansion and intensified agricultural practices in the region. These findings highlight the urgent need for sustainable management strategies to mitigate negative impacts on local ecosystems. The modeling results illustrated significant spatiotemporal transition patterns, underscoring the necessity for proactive measures to address anticipated ecological changes by 2030.

Keywords: Urbanization, Remote sensing, Spatial modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Itapecuru.....	16
Figura 2. Mapa de uso e ocupação da bacia do rio Itapecuru 2000, 2010 e 2020.....	21
Figura 3. Mapa de mudanças entre 2000, 2010 e 2020. ....	26
Figura 4. Uso e cobertura do solo real e projetado para 2020. ....	29
Figura 5. Mapa de uso e ocupação da bacia do rio Itapecuru prevista para 2030. ....	30

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1. Níveis de exatidão de uma classificação conforme índice Kappa.....	19
Tabela 2. Área de uso e ocupação do solo 2000-2010. ....	22
Tabela 3. Área de uso e ocupação do solo 2010-2020. ....	24
Tabela 4. Área de uso e ocupação do solo prevista para 2030. ....	31

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
<b>2.1.</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	14
<b>2.2.</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	14
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	15
<b>3.1.</b>	<b>Área de Estudo</b> .....	15
<b>3.1.1</b>	<b>Águas no Maranhão</b> .....	15
<b>3.1.2</b>	<b>Bacia hidrográfica do rio Itapecuru</b> .....	15
<b>3.2.</b>	<b>Coleção de dados e classificação de uso e cobertura</b> .....	16
<b>3.3.</b>	<b>Análise de mudanças e modelagem de potencial de transição</b> .....	18
<b>3.4.</b>	<b>Validação do Modelo</b> .....	18
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	20
<b>4.1.</b>	<b>Uso e Cobertura do solo da bacia</b> .....	20
<b>4.2.</b>	<b>Mudanças de uso e cobertura</b> .....	25
<b>4.3.</b>	<b>Modelagem de Potencial de Transição e Validação de Modelo</b> .....	28
<b>4.4.</b>	<b>Predição de uso e cobertura</b> .....	30
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	33
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	34

## 1. INTRODUÇÃO

O ritmo acelerado da expansão econômica e o aumento da população resultam em urbanização e mudanças no uso e cobertura da terra (Halefom *et al.*, 2018). A influência humana nas paisagens é um dos principais motores dos mecanismos regionais de mudança de uso e cobertura e essa utilização do habitat natural, como a urbanização, a segmentação de terras agrícolas e a perda de espaços verdes, altera profundamente a ecologia local (Ribeiro *et al.*, 2017; Bhunia *et al.*, 2021).

Acredita-se que o aumento da urbanização seja o principal impulsionador da perda de terras agrícolas e espaços verdes, o que pode ter um impacto significativo nas mudanças climáticas e que os processos de urbanização e o desenvolvimento industrial resultaram num aumento dramático das áreas urbanizadas (Pribadi *et al.*, 2015).

O desenvolvimento sustentável depende da mudança no uso e cobertura da terra, que é um dos principais fatores que causam mudanças ambientais em escala mundial (Padma *et al.*, 2022). Essas alterações na paisagem devem ser estudadas sob diversos aspectos, a fim de analisar suas causas, progressão e efeitos.

O crescimento urbano é sinal de desenvolvimento econômico, porém, tem contribuído para mudanças relacionadas à paisagem (Aithal *et al.*, 2016). O padrão geográfico de desenvolvimento da terra que ocorreu para atender às demandas dos fatores antrópicos é considerado dinâmica urbana e tem um grande impacto no padrão de uso da terra.

A análise da dinâmica espaço-temporal dos padrões de uso /cobertura da terra em bacias hidrográficas pode oferecer informações sobre os níveis de conservação, preservação e interferência antrópica do meio ambiente (Barros *et al.*, 2013). Tais avaliações permitem mapear as áreas de maior suscetibilidade aos processos erosivos (Shi *et al.*, 2013; Bezerra; Silva, 2014). Outras pesquisas indicam que os mapas são a base para a análise das áreas de preservação permanente de integridade (Reis *et al.*, 2012; Nery *et al.*, 2013) e permitem a identificação e gestão de conflitos de uso da terra (Melo *et al.*, 2010; Pacheco *et al.*, 2014).

Para uma estratégia de planejamento referente a gestão do uso e cobertura da terra, torna-se necessário identificar a previsão de mudanças futuras da terra (Khwarahm *et al.*, 2021). Os benefícios são muitos e é frequentemente utilizado como indicador do impacto humano nos processos de mudança da terra. Em várias medidas de adequação e múltiplas teorias, podem prever o estado futuro de um sistema com base apenas na forma que o precedeu (Tadese *et al.* (2021; Khan *et al.*, 2022).

Muhammad *et al.* (2022) defendem que a criação de uma matriz de probabilidade de transição para a mudança de uso e ocupação da terra de um período para outro permite prever mudanças futuras. Os autores usaram imagens de satélite multiespectrais e o modelo MOLUSCE para prever a mudança do uso e ocupação em diferentes regiões. Também calcularam as taxas de transferência entre outros usos da terra e estimaram suas condições.

O MOLUSCE é uma aplicação computacional para analisar, modelar e simular mudanças no uso e ocupação da terra (Alshari *et al.*, 2022). O *plugin* tem algoritmos bem conhecidos para análise de mudança de uso/cobertura do solo, análise urbana e projetos e aplicações florestais (Khawaldah *et al.*, 2020).

A cidade de Itapecuru-Mirim, onde o rio Itapecuru percorre em seu baixo curso, possui uma população de 60.419 habitantes, com densidade demográfica de 40,81 hab/km<sup>2</sup> e com um território de 1.480,641 km<sup>2</sup> (IBGE, 2022). A cidade se desenvolveu a partir das margens do rio, sendo que boa parte da população vive em vilarejos próximos às margens desse curso natural de água e tem sua renda proveniente do mesmo. No entanto, a degradação desse rio provoca riscos aos recursos naturais e podem degradar os ecossistemas associados, ampliando a possibilidade de surgimento de conflitos socioambientais.

Desta forma, impõem-se como necessidade prioritária investigar cientificamente procedimentos e indicadores para a análise do processo de planejamento da bacia hidrográfica do rio Itapecuru, proporcionando a elaboração de instrumentos técnico-científicos para avaliação do seu estado de conservação, de forma a auxiliar na tomada de decisão para gestão sustentável das atividades antrópicas que se desenvolvem na sua área de influência.

Neste cenário, o presente trabalho visa contribuir para o entendimento dessas dinâmicas, explorando o uso de técnicas de sensoriamento remoto, com foco específico na bacia hidrográfica do rio Itapecuru. Além disso, propõe-se realizar uma previsão da dinâmica futura do uso e cobertura da terra. Ao analisar as transformações no uso e cobertura da terra dessa região, busca-se relacioná-las com os parâmetros ambientais e socioeconômicos da área de estudo e fornecer *insights* para orientar estratégias de planejamento e gestão sustentável desses ecossistemas cruciais.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Compreender a dinâmica do uso e cobertura da terra no período abrangido entre os anos de 2000, 2010 e 2020, de modo a detectar mudanças nos padrões da paisagem da região da bacia hidrográfica do rio Itapecuru.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Mapear as diferentes unidades de paisagem da bacia hidrográfica do rio Itapecuru;
- Identificar os principais padrões e focos de alteração da paisagem da região;
- Realizar a predição de um cenário futuro para os anos de 2030.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Área de Estudo**

##### **3.1.1 Águas no Maranhão**

O rio Itapecuru atualmente sofre de poluição por esgotos domésticos e por possíveis impactos de resíduos/rejeitos gerados de pequenas fábricas e indústrias. Este material poluidor pode ser transportado também pelos pequenos riachos locais, carregando matéria orgânica, fezes e muitas vezes carregadas de nitrogênio, fósforo, entre outros compostos, podendo afetar também parâmetros de qualidade da água, tais como: dureza da água, odor, acidez, condutividade, turbidez e oxigênio dissolvido (Sousa *et al.*, 2013).

Conforme o IMESC (2019), o estado do Maranhão possui uma legislação estadual vigente destinada a organizar e estabelecer diretrizes para o planejamento visando à preservação dos recursos hídricos. Embora exista regulamentação para o conjunto de bacias do estado, os Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs) têm mostrado uma postura passiva, visto que atualmente são destacadas as Leis nº 9.956/2013 e nº 9.957/2013, aprovadas em 21 de novembro de 2013, que se referem somente aos comitês das bacias dos rios Munim e Mearim, respectivamente.

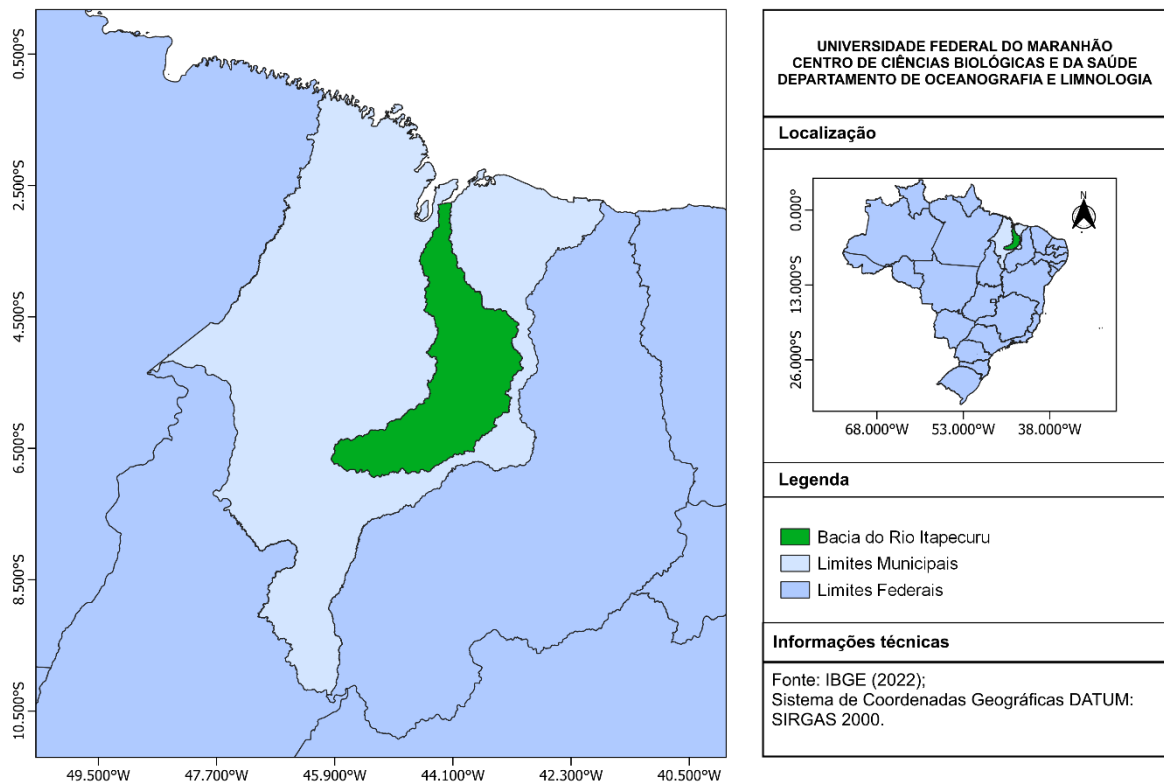
Em relação à demanda hídrica existente no Maranhão, acredita-se que cerca de 158 municípios dispõem de abastecimento subterrâneo e 11 de abastecimento misto (superficial e subterrâneo). Nesse contexto destaca-se o aquífero Itapecuru, responsável em suprir cerca de 107 sedes urbanas, com potencialidade hídrica do sistema alta e média (ANA, 2010).

##### **3.1.2 Bacia hidrográfica do rio Itapecuru**

A bacia hidrográfica do rio Itapecuru compreendida na parte centro-leste do Maranhão, entre as coordenadas de 2° 51' 33" a 6° 52' 22" S e 43° 02' 49" a 45°58'57" O, ocupa aproximadamente 16% das terras do estado, com uma área de 53.216,84 km<sup>2</sup> (NUGEO, 2016).

O Itapecuru nasce no sul do estado a 530 m de altitude, no sistema formado pelas Serras da Croeira, Itapecuru e Alpercatas (IMESC, 2015). Inicialmente o percurso da bacia é sentido oeste-leste maranhense até Várzea do Cerco, seguindo sentido ao norte para rio Alpercatas, que a partir do mesmo segue em direção ao nordeste, indo de encontro com o rio Correntes e desviando sentido noroeste (Bandeira, 2013). A partir daí se estende até sua foz na baía de São José/Arraial, ao sul da Ilha de São Luís e desemboca no oceano por meio de dois braços de rios denominados de Tuchá e Mojó (CODEVASF 2017; CODEVASF, 2019).

**Figura 1.** Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Itapecuru.



**Fonte:** Autoria Própria (2024)

Os afluentes de maior relevância dessa bacia são: rio Alpercatas, rio Corrente, rio Pucumã, rio Santo Amaro, rio Itapecuruzinho, rio Tapuia, rio Peritoró, rio Gameleira, rio Pirapemas, e rio Codozinho (CODEVASF, 2019). A bacia do rio Itapecuru é dividida fisiograficamente em três regiões distintas: alto, médio e baixo Itapecuru, que será o foco da presente pesquisa. Segundo Martins (2023), o alto Itapecuru vai da nascente até o município de Colinas. Já o médio Itapecuru vai do município de Colinas até o município de Caxias. Por fim, o baixo Itapecuru inicia-se no município de Caxias até a foz, na Baía do Arraial.

Integram esta bacia 57 municípios, dos quais 37 têm suas sedes dentro da bacia e 20 fora dela. Os recursos hídricos da bacia têm múltiplos usos, dos quais se pode destacar o abastecimento humano inclusive para a capital São Luís; transporte; recreação; dessedentação de animais; irrigação; agricultura de vazante; navegação (Santos, 2010).

### 3.2. Coleção de dados e classificação de uso e cobertura

Na primeira etapa foi realizada a aquisição de imagens da plataforma MapBiomass, acessível e processada através do Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017), para geração de



mapas uso da terra, para os anos de 2000, 2010 e 2020 de modo a permitir uma análise de 20 anos do uso da cobertura da terra na região da bacia hidrográfica do rio Itapecuru.

O MapBiomias é um projeto que envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG (Sistema de Informação Geográfica) e ciência da computação. Estes, utilizam processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017) para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil.

O conjunto de dados de imagens de satélite utilizado no projeto MapBiomias é composto pelos sensores Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) e Operational Land Imager (OLI) Landsat, a bordo do Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8, respectivamente (Souza *et al.*, 2020). O MapBiomias utiliza como fonte dos dados de superfície reflectância o Tier 1 do Landsat 8 fornecidos pelo USGS (U.S. Geological Survey).

Os mapas têm sua melhor aplicação em escalas até 1:100.000 e são gerados a partir de imagens LANDSAT 8, com resolução espacial de 30 metros (Souza *et al.*, 2020). Assim, cada pixel das imagens é classificado, entre 27 classes de uso da terra.

As classes de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomias são agrupadas em 4 níveis, levando em consideração sua escala de detalhamento. No nível 1 observa-se o agrupamento mais abrangente, onde os usos e cobertura da terra estão separados em 6 classes, sendo elas: Floresta; Formação Natural não Florestal; Agropecuária; Área não vegetada; Corpos D'água e Não Observado. Os usos e cobertura da terra referentes ao nível 2 se dividem em 20 classes, separadas em: Formação Florestal; Formação Savânica; Mangue; Restinga Arborizada; Campo Alagado e Área Pantanosa; Formação Campestre; Apicum; Afloramento Rochoso; Restinga Herbácea/Arbustiva; Outras Formações não Florestais; Pastagem; Agricultura; Silvicultura (monocultura); Mosaico de Agricultura e Pastagem; Praia, Duna e Areal; Área Urbanizada; Mineração; Outras Áreas não Vegetadas; Rio, Lago e Oceano e Aquicultura. Já os níveis 3 e 4 de detalhe se restringem ao uso e cobertura da terra relacionada a agricultura, onde no nível 3 a classe supracitada se fragmenta em “Lavoura Temporária” e “Lavoura Perene”, e no nível 4 ocorre uma subdivisão da classe “Lavoura Temporária” nas classes “Soja”, “Cana-de-açúcar”, “Arroz”, “Algodão” e “Outras Lavouras Temporárias”, enquanto a classe “Lavoura Perene” se subdivide em “Café”, “Citrus” e “Outras Lavouras Perenes” (PROJETO MAPBIOMAS, 2022).

Foi utilizado no presente estudo as classes de uso e cobertura da terra do MapBiomias no nível 2 de detalhamento, todavia, algumas classes não se mostraram presente no município nos anos utilizados, compondo assim, nesse primeiro momento, o uso e cobertura da terra em Araraquara nos anos de 2000, 2010 e 2020 as classes: Formação Florestal; Formação Savânica;

Campo Alagado e Área Pantanosa; Formação Campestre; Pastagem; Agricultura; Silvicultura (monocultura); Mosaico de Agricultura e Pastagem; Área Urbanizada; Outras Áreas não Vegetadas e Rio, Lago e Oceano.

### 3.3. Análise de mudanças e modelagem de potencial de transição

O modelo das perspectivas de transição espaço-temporal e o cenário futuro do uso e cobertura da terra neste trabalho foi realizado utilizando o *plugin* Modules for Land-Use Change Simulation (MOLUSCE) sob o QGIS (Perović *et al.*, 2018; Satya *et al.* 2020).

O *plugin* MOLUSCE é um modelo de código aberto para QGIS versão 2.0, desenvolvido pela Asia Air Survey para analisar, modelar e simular mudanças de uso/cobertura da terra. O *plugin* incorpora uma série de algoritmos bem conhecidos, como módulos de utilidade, técnicas de tabulação cruzada e módulos algorítmicos (Muhammad *et al.*, 2022).

Os mapas de uso e cobertura da terra do município da área de estudo correspondem a série temporal referente aos anos de 2000, 2010 e 2020. A modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra foi realizada utilizando o período de simulação de 2000–2010, e o ano de 2020 como referência, para assim gerar um cenário prospectivo de uso e cobertura da terra para o ano de 2030. É importante ressaltar que o período de simulação é decorrente da diferença do período dos mapas iniciais e finais inseridos, ou seja, para prospectar um cenário futuro de 5 anos para o ano de 2025, seria necessário inserir os anos de 2010 e 2015, e utilizar o ano de 2020 como referência, por exemplo.

Para estimar mudanças espaço-temporais e calcular a transição do uso e cobertura da terra e os intervalos de 2000–2010 e 2010–2020, criou-se uma matriz de probabilidade de mudança e transição de área usando os dados de uso e ocupação do solo LULC e fatores contextuais, que incluíam linhas e colunas de categorias de paisagem nos anos inicial e final.

### 3.4. Validação do Modelo

Com base nos dados de uso e cobertura do solo para os anos 2000 e 2010, juntamente com variáveis explicativas e matrizes de transição, realizou-se projeções para o ano de 2020. Para validar a precisão do modelo, utilizou-se o *plugin* MOLUSCE, que emprega a técnica de validação Kappa (Nery *et al.*, 2013) e comparação entre imagens de uso e cobertura reais e projetadas.

Para gerar o modelo de potencial de transição, adotou-se o método de uma rede neural artificial do tipo *multilayer perceptron*, onde conforme apontado por MOLUSCE (20—, p.7) o “algoritmo do processo de aprendizagem analisa a precisão alcançada nos conjuntos de amostras de treinamento e validação e armazena a melhor rede neural na memória. O processo

termina quando a melhor precisão possível é atingida”.

Utilizou-se como parâmetro de Vizinhança (*Neighbourhood*) o número 1. Esse valor corresponde ao número de pixels inseridos na análise de sua vizinhança, ou seja, 1 pixel analisado equivale a uma matriz 3x3, visto que em uma grade regular, um quadrado qualquer (representado nesse caso pelos pixels) possui 8 quadrados vizinhos que o circundam. Foi adotado o menor valor possível nesse campo, visto que dessa forma a análise da vizinhança dos pixels acontece de forma mais específica e detalhada, conferindo uma generalização menor da análise da área de estudo.

Para a Taxa de aprendizagem (*Learning rate*) e o impulso (*momentum*), também foram adotados os menores valores possíveis, sendo ele de 0,001 para ambos. Esses campos correspondem aos parâmetros de aprendizagem da rede, onde no caso do “*learning rate*”, grandes valores não permitir uma aprendizagem rápida da rede, porém instável, apresentando picos no gráfico, enquanto pequenos valores

No processo de treinamento da Rede Neural Artificial (RNA), foram configuradas 100 iterações, uma vizinhança de  $3 \times 3$  pixels, uma taxa de aprendizagem de 0,001, 12 camadas ocultas e um momento de 0,05 para projetar o uso e cobertura do solo para 2020. Após obter resultados satisfatórios na validação do modelo, aplicou-se os dados de Uso e Cobertura da Terra (LULC) de 2010 e 2020, para prever o uso e cobertura do solo até 2030.

O índice kappa, ou coeficiente kappa, é uma métrica estatística usada para medir a concordância entre observadores ou métodos de classificação. Amplamente aplicado em análises de imagem e geoprocessamento, o índice avalia a precisão de classificações automáticas ou manuais, comparando as classificações reais com as previstas. Este coeficiente considera a probabilidade de concordância que poderia ocorrer por acaso (Foody; Arora, 1997). A Tabela 1 ilustra os níveis de precisão de uma classificação de acordo com o índice kappa.

**Tabela 1.** Níveis de exatidão de uma classificação, conforme índice Kappa.

Índice kappa (K)	Qualidade
< 0,00	Péssima
0,00 - 0,20	Ruim
0,20 - 0,40	Razoável
0,40 - 0,60	Bom
0,60 - 0,80	Muito bom
0,80 – 1,00	Excelente

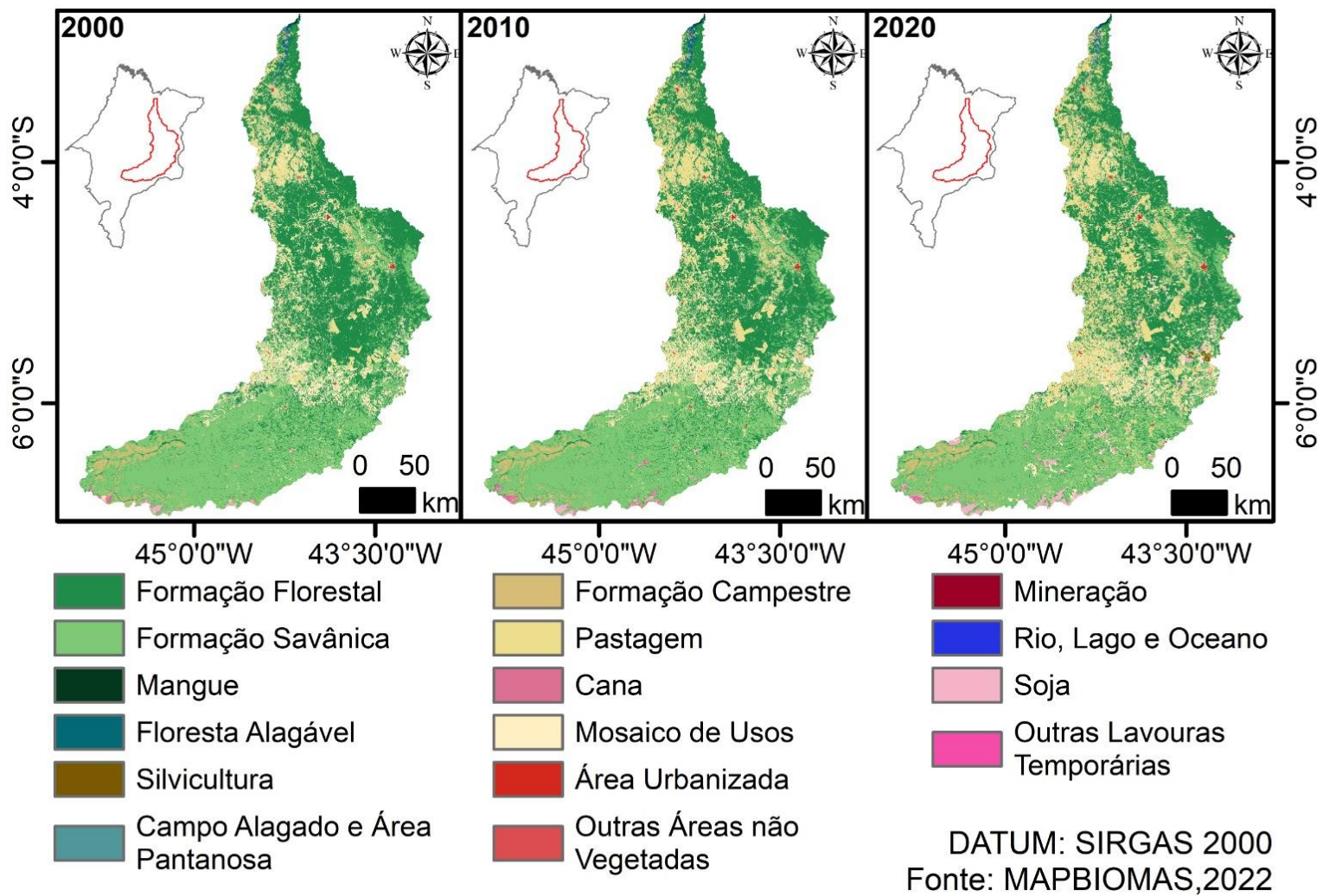
**Fonte:** Nery *et al.* (2013).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Uso e Cobertura do solo da bacia**

Ao longo do período estudado, observaram-se mudanças significativas na paisagem da bacia hidrográfica do rio Itapecuru, resultantes da expansão desordenada que abrange desde o alto até o baixo curso (Figura 2). Foram identificadas 16 classes de uso da terra, incluindo formações florestais, savânicas, manguezais, áreas alagáveis, áreas de silvicultura, campos alagados e áreas pantanosas, formações campestres, pastagens, cultivo de cana-de-açúcar, mosaicos de usos, áreas urbanizadas, além de áreas não vegetadas, mineração, rios, lagos e oceano, cultivos de soja e outras lavouras temporárias. Destaca-se a fragmentação e destruição das áreas florestais, sobretudo devido à expansão urbana observada no ambiente.

**Figura 2.** Mapa de uso e ocupação da bacia do rio Itapecuru 2000, 2010 e 2020.



Fonte: Autoria Própria (2024)

Entre os anos 2000 e 2010, a bacia hidrográfica do Itapecuru testemunhou um aumento significativo nas áreas dedicadas à pastagem, que cresceram de 3.629,96 km<sup>2</sup> para 6.243,01 km<sup>2</sup>, e à silvicultura, com um aumento de 14,54 km<sup>2</sup>. Esse cenário foi acompanhado por uma redução nas áreas de vegetação natural, incluindo formações florestais, savânicas e manguezais, que apresentaram perdas de 1.148,69 km<sup>2</sup>, 738,51 km<sup>2</sup> e 0,19 km<sup>2</sup>, respectivamente, como detalhado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Área de uso e ocupação do solo nas diferentes unidades de paisagem, no período entre 2000-2010.

Intervalo de classe	km <sup>2</sup>			%		
	2000	2010	Variação	2000	2010	Variação
Formação Florestal	21621,53	20472,84	-1148,69	14,327	13,566	-0,761
Formação Savânica	18480,94	17742,43	-738,51	12,246	11,757	-0,489
Mangue	19,01	18,81	-0,19	0,013	0,012	0,000
Floresta Alagável	178,27	195,74	17,47	0,118	0,130	0,012
Silvicultura	3,11	17,66	14,54	0,002	0,012	0,010
Campo Alagado e Área Pantanosa	126,15	146,81	20,66	0,084	0,097	0,014
Formação Campestre	1250,15	1247,67	-2,48	0,828	0,827	-0,002
Pastagem	3629,96	6243,01	2613,05	2,405	4,137	1,732
Cana	42,78	92,39	49,61	0,028	0,061	0,033
Mosaico de Usos	6619,99	5579,53	-1040,46	4,387	3,697	-0,689
Área Urbanizada	88,30	114,62	26,32	0,059	0,076	0,017
Outras Áreas não vegetadas	38,15	34,07	-4,08	0,025	0,023	-0,003
Mineração	6,19	9,52	3,33	0,004	0,006	0,002
Rio, Lago e Oceano	64,10	57,05	-7,05	0,042	0,038	-0,005
Soja	129,96	250,55	120,59	0,086	0,166	0,080
Outras Lavouras Temporárias	24,72	100,63	75,91	0,016	0,067	0,050

**Fonte:** Autoria Própria (2024)

Além disso, áreas destinadas à monocultura, como cultivo de soja e cana-de-açúcar, também registraram aumentos consideráveis, passando de 129,96 km<sup>2</sup> para 250,55 km<sup>2</sup> e de

42,78 km<sup>2</sup> para 92,39 km<sup>2</sup>, respectivamente. Essas atividades agrícolas intensivas podem exercer impactos diretos nos corpos hídricos da região, como indicado pela variação negativa de 7,05 km<sup>2</sup> dessas regiões no período analisado. Esses resultados sugerem um padrão de intensificação das práticas agrícolas e de exploração de recursos naturais na bacia do Itapecuru ao longo da década.

A expansão das áreas destinadas à pastagem, silvicultura e monocultura está diretamente ligada à perda de vegetação nativa, o que representa uma ameaça à biodiversidade local, aumenta a suscetibilidade à erosão do solo e tem impactos adversos na qualidade da água dos rios e córregos da região, visto não há preocupação com a conservação dos recursos naturais, e as zonas ripárias dos córregos estão sendo desmatadas para a implementação de atividades agrícolas ou pastoris. A limpeza dessas áreas frequentemente envolve a utilização do fogo, o que contribui significativamente para a degradação ambiental. Este processo não apenas elimina a vegetação, mas também compromete a matéria orgânica do solo, que desempenha um papel crucial na manutenção da sua fertilidade e capacidade produtiva.

Dentre os problemas associados à degradação dos ecossistemas aquáticos, destaca-se o cultivo de vazante nas margens dos rios, especialmente no Médio e Baixo Itapecuru. Os moradores dessas regiões utilizam os primeiros 20 metros das margens para o plantio de culturas como feijão, milho, melancia, maxixe e quiabo. A proximidade com a calha do rio é um fator determinante para essa prática, pois a irrigação é realizada manualmente. Uma faixa de quatro a doze metros da margem é trabalhada para o cultivo, e todo o material resultante da capina é despejado diretamente no leito do rio.

Outro aspecto relevante é a transformação da estrutura produtiva regional a partir de 1970, com a instalação de grandes projetos agropecuários que aumentaram a concentração de terras e causaram a desestruturação social e econômica de milhares de famílias, forçadas a migrar para zonas urbanas ou outras regiões (IBGE, 1998). A agricultura mecanizada, especialmente a produção de arroz e mais recentemente de soja, tem levado à supressão da cobertura vegetal, intensificado os processos erosivos e aumentado a poluição hídrica devido ao carreamento de agrotóxicos e fertilizantes. A prática agropecuária, quando conduzida sem um manejo adequado, contribui para a degradação dos corpos hídricos, remoção da cobertura vegetal, a erosão do solo, poluição da água e outros impactos negativos, conforme destacado por Wust, Tagliane e Concrato (2015).

Além disso, observa-se um aumento na área urbanizada, que cresceu de 88,30 km<sup>2</sup> para 114,62 km<sup>2</sup> ao longo do período analisado. Esse crescimento urbano pode ser uma justificativa para as mudanças na paisagem e o aumento das atividades agropecuárias na região. Segundo o

estudo da CODEVASF (2019), observa-se uma ocupação irregular significativa em grande parte da bacia hidrográfica do rio Itapecuru, onde o avanço do desmatamento foi notado em áreas cruciais para a recarga de aquíferos, incluindo nascentes e matas ciliares. Além disso, o manejo inadequado dos solos foi identificado como um problema sério, especialmente devido às práticas agropecuárias inadequadas que resultam em processos erosivos, salinização e, em alguns casos, na formação de áreas desertificadas.

Esses padrões de uso da terra não só comprometem a saúde dos ecossistemas locais, mas também aumentam a exposição da região a impactos ambientais adversos, como perda de biodiversidade, degradação da qualidade da água e diminuição da resiliência climática.

Entre 2010 e 2020, ocorreu uma redução significativa na cobertura florestal na área estudada, diminuindo de 20.472,84 km<sup>2</sup> para 18.589,00 km<sup>2</sup> (Tabela 3). Esse declínio foi principalmente atribuído ao crescimento das áreas urbanizadas, que aumentaram em 29,5 km<sup>2</sup>, e às práticas de pastagem, que expandiram em 3.538,75 km<sup>2</sup>. Essas mudanças refletem um padrão de alteração na paisagem em comparação com o período de 2000 a 2010.

**Tabela 3.** Área de uso e ocupação do solo nas diferentes unidades de paisagem, no período entre 2010-2020.

Intervalo de classe	km <sup>2</sup>			%		
	2010	2020	Variação	2010	2020	Variação
Formação Florestal	20472,84	18589,00	-1883440,00	13,57	12,318	-1,248
Formação Savânica	17742,43	15656,62	-2085,80	11,76	10,375	-1,382
Mangue	18,81	19,14	0,33	0,01	0,013	0,000
Floresta Alagável	195,74	119,53	-76,21	0,13	0,079	-0,051
Silvicultura	17,66	79,29	61,63	0,01	0,053	0,041
Campo Alagado e Área Pantanosa	146,81	185,59	38,78	0,10	0,123	0,026
Formação Campestre	1247,67	1235,69	-11,98	0,83	0,819	-0,008
Pastagem	6243,01	9781,76	3538,75	4,14	6,482	2,345
Cana	92,39	53,42	-38,97	0,06	0,035	-0,026
Mosaico de Usos	5579,53	5296,04	-283,49	3,70	3,509	-0,188
Área Urbanizada	114,62	143,87	29,25	0,08	0,095	0,019
Outras Áreas não vegetadas	34,07	59,75	25,67	0,02	0,040	0,017



Mineração	9,52	10,69	1,17	0,01	0,007	0,001
Rio, Lago e Oceano	57,05	48,10	-8,94	0,04	0,032	-0,006
Soja	250,55	951,25	700,70	0,17	0,630	0,464
Outras Lavouras Temporárias	100,63	93,19	-7,44	0,07	0,062	-0,005

**Fonte:** Autoria Própria (2024)

A transformação é especialmente notável no curso médio do rio Itapecuru, onde uma parcela significativa da população da bacia reside nos municípios de Caxias, Codó e Coroatá, localizados às margens do rio. Esse cenário é impulsionado pela expansão do agronegócio e pelo estabelecimento de grandes indústrias, que contribuem para o crescimento de áreas abertas e urbanizadas na região (IMESC, 2019).

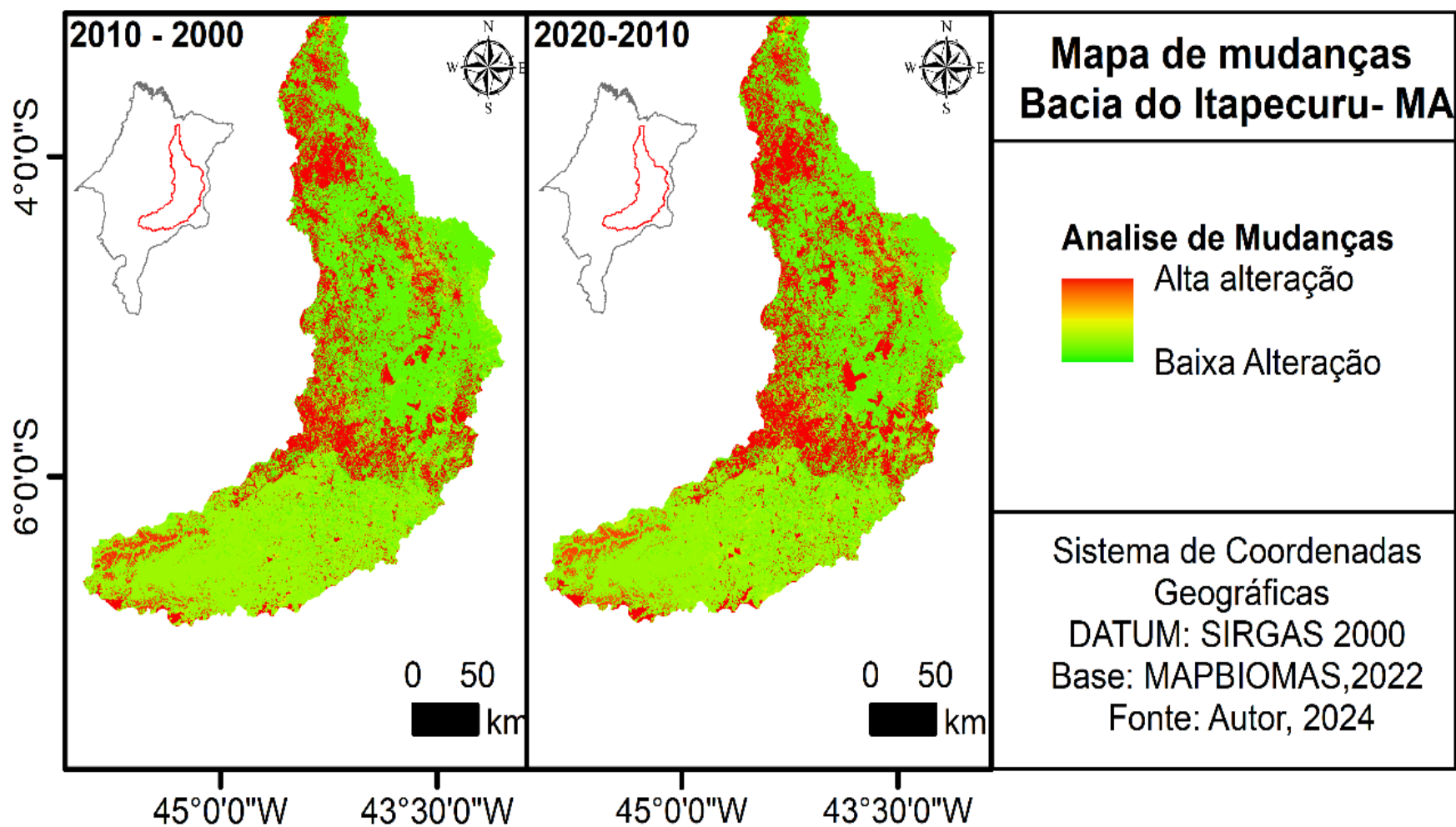
Por outro lado, observou-se um aumento substancial no número de fragmentos de cobertura florestal na região devido à expansão das pastagens e silvicultura, que cresceram significativamente na última década estudada (de 17,66 km<sup>2</sup> para 79,29 km<sup>2</sup>), especialmente ao longo dos afluentes do Itapecuru. Esse fenômeno indica uma maior fragmentação das áreas com vegetação, devido ao avanço das atividades agropecuárias e florestais na área de influência da bacia hidrográfica.

Ao longo dos anos, observou-se uma contínua redução das áreas de corpos hídricos, com uma diminuição de 8,94 km<sup>2</sup>. Esse padrão também foi notado nas áreas de mineração, que aumentaram de 9,52 km<sup>2</sup> para 10,69 km<sup>2</sup>. Segundo a CODEVASF (2019), a mineração é uma atividade significativa na criação de empregos e geração de renda no estado do Maranhão. Existem diversos minerais no estado que contribuem para o desenvolvimento e infraestrutura local, destacando-se a produção de tijolos, telhas e lajotas nos municípios de Itapecuru Mirim, Rosário, Imperatriz, Timon e Caxias. A extração de brita nos municípios de Bacabeira e Rosário, além da extração de calcário e areia, complementam os minerais mais extraídos na bacia hidrográfica (MARANHÃO, 2017).

#### **4.2. Mudanças de uso e cobertura**

A análise de mudança de uso e cobertura explora as dinâmicas espaciais no ambiente. A Figura 3 ilustra os padrões de mudança na região da bacia hidrográfica do rio Itapecuru, no intervalo de tempo investigado.

Figura 3. Mapa de mudanças entre 2000, 2010 e 2020.



Fonte: Autoria Própria (2024)

As áreas em vermelho indicam uma alta taxa de alteração na paisagem, possivelmente devido a desmatamento, urbanização, mineração ou outras atividades humanas intensivas. Essas áreas provavelmente sofreram significativas mudanças na cobertura vegetal e no uso do solo. As áreas em amarelo representam alterações moderadas, onde as transformações foram menos intensas, mas ainda significativas. As áreas em verde, por sua vez, mostram baixa alteração, mantendo características naturais ou sofrendo mudanças mínimas.

O aumento das áreas com alta e moderada alteração sugere uma crescente pressão sobre o ambiente na bacia do Itapecuru. A concentração de alta alteração em certas áreas pode indicar pontos críticos para intervenções de conservação e manejo sustentável. A análise temporal entre os períodos 2010-2000 e 2020-2010 pode revelar tendências específicas, como o avanço da urbanização e, conseqüentemente, ocupação desordenada da região.

No ano de 2000, de modo geral, os principais focos de alteração da paisagem se concentraram nas regiões do médio e baixo curso da bacia hidrográfica do rio Itapecuru. Áreas extensivas eram dedicadas à pastagem e cultivos agrícolas, com destaque para monoculturas. Essas atividades fundamentais para a economia local apresentam desafios como erosão do solo e a perda de habitats, reduzindo a disponibilidade de recursos naturais (Lambin; Geist, 2006).

IMESC (2019) destaca que a partir da década de 1990, mudanças socioeconômicas significativas ocorreram em várias regiões do Maranhão devido à chegada de grandes empresas como a Vale, Alumar e Suzano Papel e Celulose, além da expansão do agronegócio com cultivos de soja, eucalipto e criação de bovinos. Essas transformações consolidaram-se nos anos 2000, com uma maior ocupação, especialmente na região entre o baixo e médio curso da bacia, destacando-se os municípios de Itapecuru-Mirim, Coroatá, Codó e Caxias.

A partir do ano de 2010 houve um aumento expressivo das áreas urbanizadas na bacia. Esse crescimento pode indicar desenvolvimento econômico, mas também está associado a problemas como aumento de superfícies impermeáveis, alterações nos padrões de escoamento e aumento da poluição urbana. Observa-se que por abranger uma grande parte da Região Metropolitana da Grande São Luís, o baixo curso do rio tem sido especialmente afetado por grandes transformações nas últimas duas décadas. Segundo a CODEVASF (2019), há previsões de expansão dessas mudanças, incluindo a possível instalação de grandes projetos industriais.

Os resultados de 2000 a 2020 mostram uma notável preservação da paisagem na região do alto Itapecuru, fenômeno esse que pode ser atribuído ao baixo contingente populacional e à existência de áreas protegidas, como o Parque Estadual do Mirador, que abrange aproximadamente um terço do alto curso da bacia do rio Itapecuru (IMESC,2019). Apesar dos esforços de conservação, a região tem passado por mudanças constantes, incluindo o aumento

das atividades agrícolas e pecuárias. Anualmente, áreas de floresta têm sido convertidas em pastagens ou destinadas à agricultura na área.

No estudo de Caldas *et al.* (2014), foi observado que a parte central do Parque Estadual do Mirador, localizada na Serra do Itapecuru, apresenta características que favorecem práticas agropecuárias. Devido à topografia da serra, que possui variações de altitude reduzidas, essa área proporciona condições propícias para atividades desse ramo. Desse modo, a região acaba enfrentando pressões significativas dessas atividades intensivas nas áreas circundantes, que pode ser prejudicial ao ambiente físico ao redor da unidade de conservação.

Para melhorar a precisão na identificação das áreas com baixa alteração na paisagem até o cenário de 2030, a inclusão de um Modelo Digital de Elevação (DEM) poderia oferecer uma visão mais detalhada das características topográficas da região. Isso permitiria uma análise mais precisa das condições físicas que influenciam a distribuição e a intensidade das práticas agropecuárias, ajudando a identificar áreas suscetíveis a alterações futuras e a implementar estratégias de conservação mais eficazes.

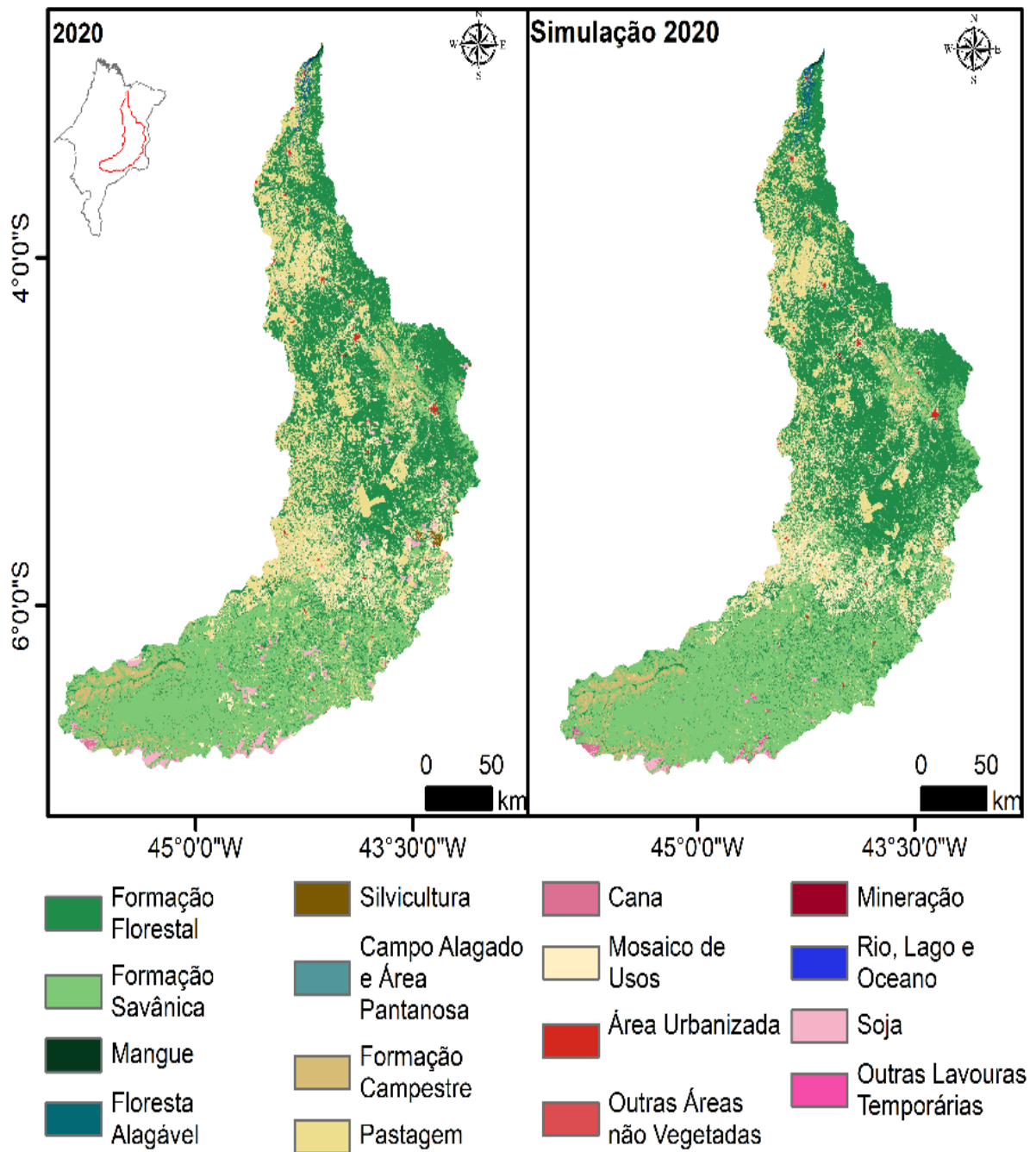
Todavia, apesar de ter se tornado uma fronteira para expansão agrícola por fazendeiros e empresários devido à qualidade do solo na região centro-sul do Estado, as medidas restritivas dentro dos limites do parque têm sido cruciais para limitar o avanço das atividades do agronegócio. Essas restrições não apenas protegem a biodiversidade e os recursos naturais, mas também preservam as práticas socioculturais das comunidades locais, contribuindo para a sustentabilidade ambiental da região.

#### **4.3. Modelagem de Potencial de Transição e Validação de Modelo**

A modelagem do potencial de transição para validar o modelo de projeção do uso e cobertura da terra para o ano de 2020 alcançou um índice kappa de validação acima de 0,80, indicando alta precisão na previsão. Após projetar o uso e cobertura da terra, os dados reais de 2020 foram comparados aos dados projetados, revelando uma precisão geral de 92% e um índice kappa geral de 0,86, classificado na literatura como excelente.

A Figura 4 apresenta os mapas comparativos entre os dados reais e projetados para o ano de 2020, destacando a acurácia do mapeamento realizado.

**Figura 4.** Uso e cobertura do solo real e projetado para 2020.



**Fonte:** Autoria Própria (2024)

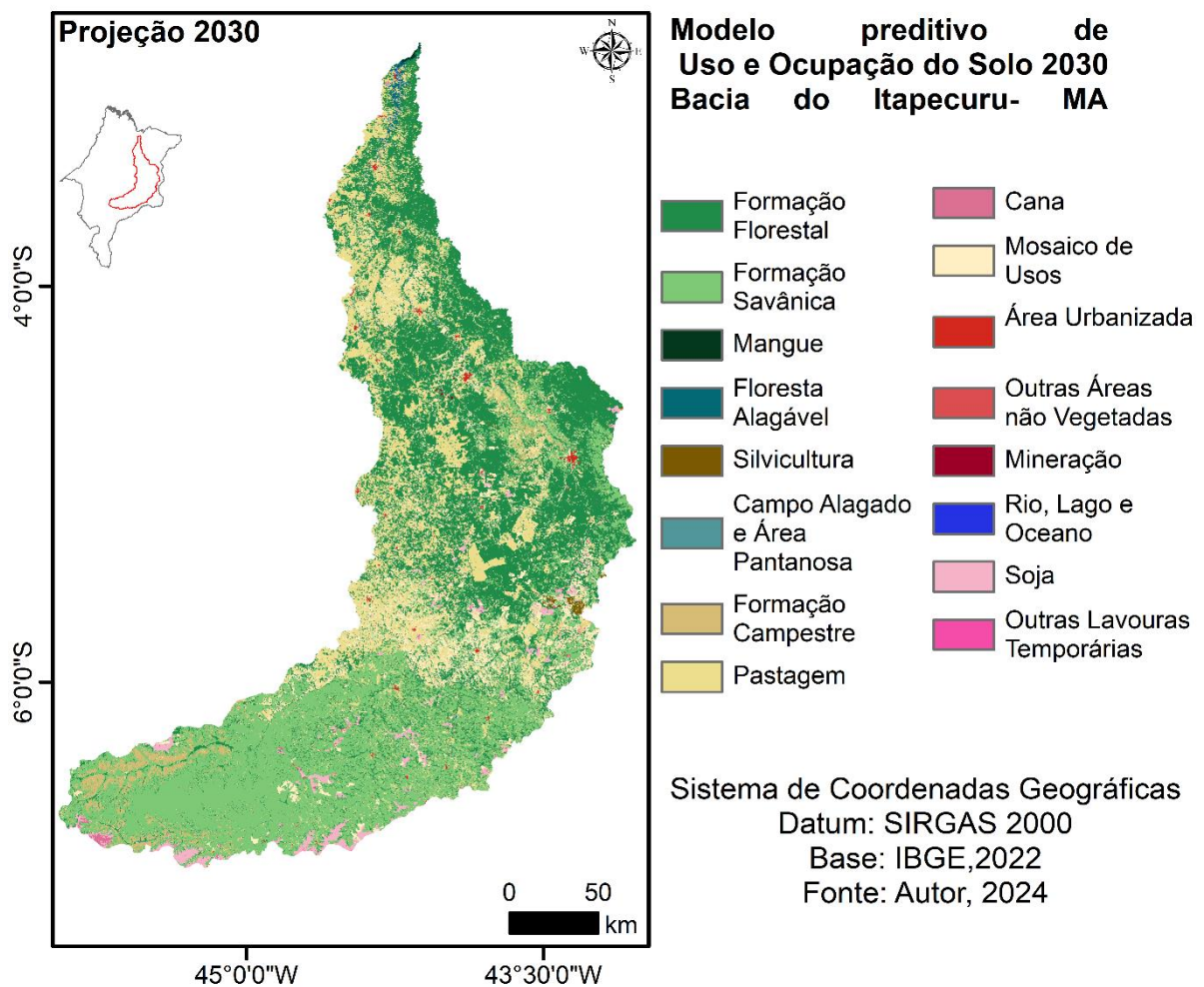
Visualmente, ao comparar o mapa real com o modelo preditivo de uso e ocupação do solo para o ano de 2020, não foram observadas diferenças significativas nas classes mais relevantes, como ocupação urbana, cultivo de soja, formações florestais/savânicas, corpos hídricos e pastagem. A região do alto Itapecuru parece manter uma tendência de conservação. No entanto, ao analisar a classe de silvicultura, nota-se uma discrepância significativa em relação à ocupação projetada pelo modelo, que indicava um padrão de baixa ocupação,

contrariando o que foi observado no mapa real. Essa diferença pode sugerir que as áreas com as maiores alterações são aquelas que apresentam mudanças mais pronunciadas ao longo dos anos, destacando-se especialmente as regiões do médio e baixo Itapecuru. Isso pode também explicar o baixo padrão de alteração da paisagem na região do alto curso da bacia hidrográfica do rio Itapecuru.

#### 4.4. Predição de uso e cobertura

A geração do mapa de predição de uso e ocupação do solo para o ano de 2030, baseado em alterações observadas nos anos de 2010 e 2020, representa um avanço significativo na modelagem de mudanças ambientais (Figura 5). O método de validação que obteve bons resultados valida a capacidade do modelo em prever mudanças futuras com maior precisão.

**Figura 5.** Mapa de uso e ocupação da bacia do rio Itapecuru prevista para 2030.



**Fonte:** Autoria Própria (2024)

No entanto, é importante ressaltar que o mapa de 2030 não demonstrou alterações significativas em comparação com anos anteriores, e que as áreas conhecidas como "mosaicos de usos", conforme definido por Silva *et al.* (2017), áreas agrícolas onde não é claramente distinguível entre pastagem e agricultura, apresentaram crescimento conforme esperado (Tabela 4).

**Tabela 4.** Área de uso e ocupação do solo prevista para 2030.

Intervalo de classe	km <sup>2</sup>			%		
	2020	2030	Variação	2020	2030	Variação
Formação Florestal	1858940	19028,66	439,26	12,361.	12,653.	0,292.
Formação Savânica	0	15168,6	-488,02	10,411.	10,086.	-0,325.
Mangue	19,14	19,14	-0,01	0,013.	0,013.	0,000.
Floresta Alagável	119,53	119,25	-0,28	0,079.	0,079.	0,000.
Silvicultura	79,29	78,72	-0,57	0,053.	0,052.	0,000.
Campo Alagado e Área Pantanosa	185,59	181,84	-3,75	0,123.	0,121.	-0,002.
Formação Campestre	1235,69	1232490	-3,2	0,822.	0,820.	-0,002.
Pastagem	9781,76	9418,28	-363,48	6,504.	6,263.	-0,242.
Cana	53,42	53,42	0	0,036.	0,036.	0,000.
Mosaico de Usos	5296,04	5737,68	441,64	3,522.	3,815.	0,294.
Área Urbanizada	143,87	143,39	-0,48	0,096.	0,095.	0,000.
Outras Áreas não Vegetadas	59,75	53,38	-6,36	0,040.	0,035.	-0,004.
Mineração	10,69	10,68	-0,01	0,007.	0,007.	0,000.
Rio, Lago e Oceano	48,1	47,9	-0,2	0,032.	0,032.	0,000.
Soja	951,25	940,72	-10,52	0,633.	0,626.	-0,007.
Outras Lavouras Temporárias	93,19	90,46	-2,73	0,062.	0,060.	-0,002.

**Fonte:** Autoria Própria (2024)

É fundamental reconhecer que os resultados de predição não são necessariamente reflexos precisos da realidade futura. Eles fornecem uma projeção baseada em dados históricos e pressupostos sobre tendências atuais.

Muhammad *et al.* (2022) observaram no seu estudo uma expansão significativa de superfícies impermeáveis e um aumento notável das áreas urbanizadas, ao passo que houve uma redução expressiva nas áreas verdes. Esses resultados divergem dos encontrados no presente estudo, possivelmente devido à inclusão de dados físicos correlacionados e à consideração de dados de supressão. Além disso, o tamanho da área estudada por Muhammad *et al.* (2022) é menor em comparação com o escopo do presente estudo, o que pode ter impactado na robustez da capacidade preditiva dos modelos utilizados por ele. Portanto, essas diferenças podem ser atribuídas à robustez, à escala e à complexidade dos modelos empregados.

Modelos mais robustos têm o potencial de fornecer indicadores mais precisos para avaliações subsequentes, especialmente no que diz respeito ao aumento das áreas de vegetação natural, que pode ser identificado de forma mais específica devido à dinâmica pontual relacionada. Portanto, sugere-se uma análise minuciosa dos dados e dos processos subjacentes que influenciam as mudanças no uso da terra. Isso inclui considerar variáveis adicionais que podem não ter sido completamente capturadas pelo modelo que podem afetar as decisões de uso da terra no futuro.



## 5. CONCLUSÃO

A análise da bacia hidrográfica do rio Itapecuru ao longo das últimas décadas revelou mudanças profundas no uso da terra, refletindo um padrão de desenvolvimento desordenado que compromete a integridade ambiental e socioeconômica da região. A expansão urbana desenfreada, aliada ao aumento das atividades agropecuárias e à redução significativa das áreas de vegetação natural, destacam-se como principais impulsionadores dessas transformações.

Os resultados indicam que áreas críticas da bacia, especialmente no médio e baixo curso, experimentaram uma intensificação significativa nas atividades agropecuárias e urbanização, resultando em perdas consideráveis de áreas de vegetação natural. A implementação de um Modelo Digital de Elevação (DEM) pode proporcionar uma análise mais precisa das condições topográficas, identificando áreas suscetíveis a futuras alterações e proporcionando uma base robusta para estratégias de conservação e manejo sustentável.

A comparação entre os dados reais e o modelo preditivo para 2020 revelou discrepâncias na ocupação projetada das áreas de silvicultura, destacando a importância de modelos mais refinados e dados complementares para melhorar a precisão das previsões futuras. A persistente expansão das áreas urbanizadas e agrícolas na região ressalta a necessidade urgente de políticas públicas integradas que promovam um desenvolvimento equilibrado, mitigando os impactos adversos sobre os recursos naturais e a qualidade de vida das comunidades locais.

Em suma, o presente estudo enfatiza a importância de abordagens multidisciplinares e integrativas na gestão ambiental, visando não apenas a conservação dos ecossistemas, mas também o desenvolvimento sustentável e econômico das populações dependentes dos recursos naturais da bacia do rio Itapecuru.

Além disso, é essencial reconhecer a necessidade de fortalecer a credibilidade e a visibilidade do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Itapecuru. A promoção de iniciativas que aumentem a transparência nas decisões e a participação da sociedade civil é fundamental para garantir que as vozes das populações afetadas sejam ouvidas e consideradas.

Ademais, a visibilidade do comitê pode atrair investimentos e parcerias estratégicas que são vitais para a implementação de projetos de recuperação e proteção ambiental. Portanto, a consolidação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Itapecuru mais visível é um passo indispensável para garantir a implementação de políticas públicas eficazes, promover um desenvolvimento sustentável e assegurar a qualidade de vida das comunidades que dependem da mesma.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Atlas Brasil: abastecimento urbano de água. **Panorama Nacional**. v. 1. Brasília: SPR/ANA, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos** (CNDARH). 2005.

AITHAL, B. H.; RAMACHANDRA, T. V. Visualization of urban growth pattern in Chennai using geoinformatics and spatial metrics. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 44, p. 617-633, 2016.

ALMEIDA, Ueverso Silva de. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO ITAPECURU: ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E IMPACTOS ANTRÓPICOS. 2019.

Alshari, E. A., & Gawali, B. W. (2022). Analysis of Machine Learning Techniques for Sentinel-2A Satellite Images. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2022(1), 9092299.

BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (org.). **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013. 294 p.

BARROS, K. O.; MARCATTI, G. E.; COSTA, F. R.; OLIVEIRA, J. C.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SOARES, V. P.; SILVA, E. Análise temporal das classes de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio Vieira, Montes Claros, Minas Gerais. **Revista Agrogeambiental**, v. 5, p. 43-54, 2013.

BEZERRA, I. S.; SILVA, T. C. Análise de riscos à perda de solo para diferentes cenários de uso e ocupação na bacia hidrográfica do Rio Abiaí-Papocas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, p. 95-204, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p195-204>.

BHUNIA, Gouri Sankar; CHATTERJEE, Uday; SHIT, Pravat Kumar. Emergence and challenges of land reclamation: Issues and prospect. **Modern Cartography Series**, v. 10, p. 1-15, 2021.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand, 2010. p. 153-192.

Caldas, J. M., Silva, F. B., & Silva Junior, C. H. L. (2014, November). Análise de focos de queimadas no Parque Estadual do Mirador utilizando um Sistema de Informação Geográfica–SIG, Estado do Maranhão, Brasil. In Proceedings of Safety, Health and Environment World Congress (Vol. 14).

CHEN, Jun. Improving Urban Planning by Integrated Utilization of Remote Sensing and GIS's. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 29, p. 598-598, 1993.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba.. **Área de Gestão Estratégica. Unidade de Suporte Geotecnológico. Divisão fisiográfica da bacia hidrográfica do Rio Itapecuru.** 2017.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **Plano Nascente Itapecuru: plano de preservação e recuperação de nascentes da bacia hidrográfica do rio Itapecuru.**2019.

FOODY, G. M.; ARORA, M. K. An evaluation of some factors affecting the accuracy of classification by an artificial neural network. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 4, p. 799-810, 1997.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.

HALEFOM, Afera *et al.* Dynamics of land use and land cover change using remote sensing and GIS: a case study of Debre Tabor Town, South Gondar, Ethiopia. **Journal of Geographic Information System**, v. 10, n. 2, p. 165-174, 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA 2022. Censo demográfico de 2022, disponível em <[https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm\\_source=ibge&utm\\_medium=home&utm\\_campaign=portal](https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal)> Acesso em 20 de agosto de 2023.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS – IMESC. Mais Itapecuru: subsídios ao planejamento e a gestão dos recursos hídricos. São Luís, IMESC, 2019.

Khan, A., & Sudheer, M. (2022). Machine learning-based monitoring and modeling for spatio-temporal urban growth of Islamabad. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(2), 541-550.

Khawaldah, H. A., Farhan, I., & Alzboun, N. M. (2020). Simulation and prediction of land use and land cover change using GIS, remote sensing and CA-Markov model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(2), 215-232.

Khwarahm, N. R., Najmaddin, P. M., Ararat, K., & Qader, S. (2021). Past and future prediction of land cover land use change based on earth observation data by the CA–Markov model: a case study from Duhok governorate, Iraq. **Arabian Journal of Geosciences**, 14(15), 1-14.

Lambin, E. F., & Geist, H. J. (Eds.). (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer Science & Business Media.

MARANHÃO. Secretaria de Estado de Indústria Comércio e Energia. Mineração. [2017?]. disponível em: < <http://www.seinc.ma.gov.br/areas-de-atuacao/mineracao/> > . Acesso em 14 de dez. 2017.

MARTINS, R. A., DE CASTRO, A. C. L., LOURENÇO, C. B., SOARES, L. S., & MOUCHREK, A. N. (2023). Qualidade da água do baixo curso do Rio Itapecuru e as implicações na saúde humana e usos múltiplos. *REVISTA FOCO*, 16(9), e1839-e1839.

MELO, J. A. B.; LIMA, E. R. V.; PEREIRA, R. A.; DANTAS-NETO, J. Identificação das Áreas de Conflito de Uso da Terra na Microbacia do Riacho do Tronco, Boa Vista, PB. **Revista de Geografia**, v. 27, p. 185-201, 2010

METZGER, M. J.; ROUNSEVELL, M. D. A.; ACOSTA-MICHLIK, L; LEEMANS, R.;

MIGUEL, A. E.; MEDEIROS, R. B.; BRUGNOLLI, C. A. C.; OLIVEIRA, W. Análise do Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Bacia do Ribeirão do Meio, Brasilândia/MS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 1088-1098, 2012.

MUHAMMAD, Rizwan *et al.* Spatiotemporal change analysis and prediction of future land use and land cover changes using QGIS MOLUSCE plugin and remote sensing big data: a case study of Linyi, China. *Land*, v. 11, n. 3, p. 419, 2022.

NERY, C. V. M.; OLIVEIRA, D. B.; ABREU, L. H. G. Estudo comparativo entre os índices NDVI obtidos a partir dos sensores Landsat 5-TM e Resourcesat-Liss III. *Caminhos de Geografia*, v. 14, n. 46, p. 160-167, 2013.

NUGEO, Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão. **Bacias Hidrográficas e Climatologia no Maranhão Bacias Hidrográficas e Climatologia no Maranhão**. S. l.: sn, 2016.

NUGEO. Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão. **Bacias Hidrográficas: Subsídios para o planejamento e a gestão territorial. Relatório Técnico**. 2011. 47 p.

PACHECO, F. A. L.; VARANDAS, S. G. P., SANCHES FERNANDES, L. F.; VALLE JUNIOR, R. F. Soil losses in rural watersheds with environmental land use conflicts. **Science of the Total Environment**, v. 485–486, p. 110-120, 2014.

PADMA, SrinivasaPerumal *et al.* Simulation of land use/land cover dynamics using Google Earth data and QGIS: a case study on outer ring road, Southern India. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16373, 2022.

PEROVIĆ, Veljko *et al.* Spatio-temporal analysis of land use/land cover change and its effects on soil erosion (Case study in the Oplenac wine-producing area, Serbia). *Environmental monitoring and assessment*, v. 190, n. 11, p. 675, 2018.

PRIBADI, Didit Okta; PAULEIT, Stephan. The dynamics of peri-urban agriculture during rapid urbanization of Jabodetabek Metropolitan Area. **Land use policy**, v. 48, p. 13-24, 2015.

REIS, A. A.; TEIXEIRA, M. D.; ACERBI JÚNIOR, F. W.; MELLO, J. M.; LEITE, L.R.; SILVA, S. T. Land Use and Occupation Analysis of Permanent Preservation Areas in Lavras County, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, p. 300-308, 2012.

SANTOS, L.C.A. **Reflexões sobre água Subterrânea do Estado do Maranhão**. In: Congresso brasileiro de águas subterrâneas, 16.; Encontro nacional de perfuração de poços, 17., 2010, São Paulo. Anais. São Paulo: ABAS: IAH–BR, 2010.

SATYA, B. A.; SHASHI, M.; DEVA, P. Future land use land cover scenario simulation using open source GIS for the city of Warangal, Telangana, India. *Appl Geomatics* 25: 281–290. 2020.

SCHOTER, D. **The vulnerability of ecosystems services to land use change.** *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 114, n. 1, p. 69-85, 2006.

SHI, Z. H.; AI, L.; LI, X.; HUANG, X. D.; WU, G.L.; LIAO, W. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 498, p. 165–176, 2013.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Série Histórica (Água, Esgotos, Resíduos Sólidos), 2015.

SOARES, L. S.; LOPES, W. G. R.; CASTRO, A. C. L.; ARAÚJO, G. M. Análise morfométrica e priorização de bacias hidrográficas como instrument de planejamento ambiental integrado. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 31, p. 82-100, 2016. <http://dx.doi.org/10.11606/rdg.v31i0.107715>

SOARES, Leonardo Silva *et al.* Análise das Mudanças Espaço-Temporais do Uso e Cobertura da Terra nas Sub-Bacias Hidrográficas do Baixo Curso do Rio Itapecuru, Estado do Maranhão, Brasil. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 34, p. 55-67, 2017.

SOUSA, C. D.; MELO, D. M.; NASCIMENTO, J. R. **Recursos hídricos Superficiais.** In: BANDEIRA, I. C. N (Org.). *Geodiversidade do Estado do Maranhão*. Teresina: CPRM, 2013.

SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sens* 12: 2735. 2020.

Tadese, S., Soromessa, T., & Bekele, T. (2021). Research Article Analysis of the Current and Future Prediction of Land Use/Land Cover Change Using Remote Sensing and the CA-Markov Model in Majang Forest Biosphere Reserves of Gambella, Southwestern Ethiopia.

TASSER, Erich; LEITINGER, Georg; TAPPEINER, Ulrike. Climate change versus land-use change—What affects the mountain landscapes. *Land use policy*, v. 60, p. 60-72, 2017.