

MIRELE PEREIRA CASTRO

**ÁREAS PROTEGIDAS DO CERRADO: VULNERABILIDADE E ADAPTAÇÃO ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Roger Rodrigues Torres

Coorientador: Flávio Barbosa Justino

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C355a
2023 Castro, Mirele Pereira, 1997-
Áreas protegidas do cerrado: vulnerabilidade e adaptação às
mudanças climáticas / Mirele Pereira Castro. – Viçosa, MG,
2023.

1 dissertação eletrônica (60 f.): il.

Orientador: Roger Rodrigues Torres.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Referências bibliográficas: f. 53-60.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.610>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Cerrados - Conservação. 2. Mudanças climáticas.
I. Torres, Roger Rodrigues, 1982-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 577.22


MIRELE PEREIRA CASTRO

**ÁREAS PROTEGIDAS DO CERRADO: VULNERABILIDADE E ADAPTAÇÃO ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21 de julho de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 MIRELE PEREIRA CASTRO
Data: 03/10/2023 14:00:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mirele Pereira Castro
Autora

Documento assinado digitalmente
 ROGER RODRIGUES TORRES
Data: 04/10/2023 10:24:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Roger Rodrigues Torres
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo amor incondicional, pelo privilégio da vida, pela fé, esperança, amor e alegria, por ser o meu consolo em momentos difíceis e por permitir que eu tenha chegado até aqui. Agradeço à minha mãe por ser o meu porto seguro, minha maior fonte de inspiração e incentivo, por acreditar em mim e por me ensinar a valorizar os estudos, investir em mim e me apoiar em todas as minhas decisões. Agradeço a toda minha família: irmãos, avós, tios, tias, padrasto, primos e primas, mesmo distantes, vocês se fizeram presentes vibrando com o meu progresso, dedico essa conquista a todos vocês.

Agradeço ao meu orientador, Roger, por todo auxílio que me deu ao longo do mestrado: pelas reuniões, observações, ensinamentos e palavras sábias durante a orientação, por estar sempre presente, mesmo que distante, e por permitir e contribuir para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Agradeço ao Flávio e ao Everton pelas conversas construtivas que me ajudaram a organizar melhor as ideias que contribuíram no avanço científico do trabalho.

Agradeço aos professores da Pós-Graduação, pelo conhecimento transmitido, a Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de trabalho e estrutura disponibilizada. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Agradeço aos meus colegas de turma por compartilharem momentos especiais de alegria, boas risadas e aprendizados. Agradeço à Letícia, Elaine e Thaís pela amizade construída, pela parceria, por estarem presentes nos momentos bons e ruins, sem vocês, a trajetória não seria a mesma, todas são muito especiais para mim, e sem dúvidas essa conquista foi alcançada graças ao apoio de vocês. Agradeço à Graça por toda dedicação, carinho e atenção. Agradeço ao meu amigo Sérgio pelos bons momentos vividos em Viçosa, pelas muitas risadas, por ser meu braço direito e por todo apoio e parceria.

Agradeço a todos os amigos e amigas que se fizeram presentes durante toda minha trajetória (Jaime, Anne, Debora, Raquel, Mary, Rai, Sand, Bruna, Fred, Manu, Raiane, Ingrid, Naydson, Nalda), sou grata a vocês pelas palavras de conforto nos momentos de saudade, pelas ligações e conselhos, pelas risadas descontraídas e pelas palavras de incentivo. Agradeço ao Daniel pelos bons momentos compartilhados, por vibrar cada conquista, pelas palavras de motivação e por torcer pelo meu sucesso profissional. Muito obrigada a todos.

“A experiência é um professor severo. Primeiro nos dá a prova e depois aprendemos a lição”.

(Cs Lewis)

RESUMO

CASTRO, Mirele Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Áreas Protegidas do Cerrado: Vulnerabilidade e Adaptação às Mudanças Climáticas.** Orientador: Roger Rodrigues Torres. Coorientador: Flávio Barbosa Justino.

A preocupação com a manutenção do bioma Cerrado e sua relevância ecológica faz com que as estratégias de conservação in situ de áreas protegidas sejam estabelecidas. O presente estudo tem o objetivo de fornecer uma caracterização atualizada da vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do cerrado brasileiro diante as mudanças climáticas, utilizando os novos cenários socioeconômicos SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*) e dados em alta resolução provenientes do NEXGDDP-CMIP6, como ferramenta de avaliação. Para isso, foi utilizado o Índice Regional de Mudanças Climáticas (RCCI), que sintetiza dados provenientes das projeções climáticas. Avaliou-se o comportamento da vegetação no período de 1990 a 2021, utilizando a plataforma MapBiomas versão 7.1. Foi classificada a vulnerabilidade das áreas protegidas dividindo os valores de risco e resiliência em 4 partes iguais (25% de cada elemento). Foram descritas as vias de adaptação: refúgios, manutenção do ecossistema, adaptação natural e transições facilitadas, para cada área protegida. Os resultados mostraram que 91,6% das áreas protegidas do Cerrado estão classificadas entre os riscos alto e moderado, enquanto as áreas de baixo risco representam 8,4%. A resiliência das áreas varia entre alta e moderada ao longo do bioma, sendo que, 92,8% das áreas demonstram alta resiliência e apenas 7,2% moderada. As áreas apresentam baixa vulnerabilidade ambiental, no entanto, aproximadamente 15,4% dessas áreas estão classificadas como vulnerabilidade moderada e 0,5% apresentam alta vulnerabilidade. A implementação da via de adaptação manutenção do ecossistema foi indicada a 256 áreas protegidas, e representa aproximadamente 65,5% das áreas analisadas. A via de adaptação refúgios foi recomendada para 18,7% das áreas analisadas. Os resultados obtidos por meio da utilização do RCCI e MapBiomas demonstraram de maneira efetiva a vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do Cerrado brasileiro. As informações são pertinentes para embasar a formulação de estratégias de conservação com base na projeção da exposição climática futura.

Palavras-chave: Conservação da Biodiversidade. Condições climáticas. Modelos Climáticos.

ABSTRACT

CASTRO, Mirele Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2023. **Protected Areas of the Cerrado: Vulnerability and Adaptation to Climate Change**. Advisor: Roger Rodrigues Torres. Co-advisor: Flávio Barbosa Justino.

Concern about the maintenance of the Cerrado biome and its ecological relevance has led to the establishment of in situ conservation strategies for protected areas. This study aims to provide an updated characterization of the environmental vulnerability of protected areas in the Brazilian Cerrado to climate change, using the new SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) scenarios and high-resolution data from NEXGDDP-CMIP6 as an assessment tool. For this, the Regional Climate Change Index (RCCI) was used, which synthesizes data from climate projections. The behavior of vegetation from 1990 to 2021 was assessed using the MapBiomas platform, version 7.1. The vulnerability of the protected areas was classified by dividing the risk and resilience values into 4 equal parts (25% of each element). The adaptation pathways were described: refuges, ecosystem maintenance, natural adaptation and facilitated transitions, for each protected area. The results showed that 91.6% of the Cerrado's protected areas are classified between high and moderate risk, while low-risk areas account for 8.4%. The resilience of the areas varies between high and moderate throughout the biome, with 92.8% of the areas showing high resilience and only 7.2% moderate. The areas show low environmental vulnerability, however, approximately 15.4% of these areas are classified as moderately vulnerable and 0.5% as highly vulnerable. The implementation of the ecosystem maintenance adaptation pathway was indicated for 256 protected areas, and represents approximately 65.5% of the areas analyzed. The refuge adaptation pathway was recommended for 18.7% of the areas analyzed. The results obtained through the use of RCCI and MapBiomas effectively demonstrated the environmental vulnerability of protected areas in the Brazilian Cerrado. The information is relevant for formulating conservation strategies based on the projection of future climate exposure.

Keywords: Biodiversity Conservation. Climate Conditions. Climate Models.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização geográfica das Áreas Protegidas do Cerrado	16
Figura 2. Categorias das Unidades de Conservação	17
Figura 3. Distribuição das UCs ao longo do Cerrado	18
Figura 4. Classificação da vulnerabilidade	28
Figura 5. Valores de <i>RCCI</i> no Cerrado	30
Figura 6. Distribuição do risco nas áreas protegidas	32
Figura 7. Classificação do <i>RCCI</i> de acordo com cada grupo	33
Figura 8. Uso e ocupação da terra do Cerrado nos anos de 1990 e 2021	38
Figura 9. Comportamento das classes de floresta e agropecuária do Cerrado	39
Figura 10. Distribuição da resiliência das áreas protegidas	40
Figura 11. Classificação da resiliência das áreas protegidas do Cerrado	41
Figura 12. Vulnerabilidade das áreas protegidas do Cerrado	45
Figura 13. Vias de adaptação às mudanças climáticas	49
Figura 14. Vias de adaptação para as áreas protegidas do Cerrado	50
Figura 15. Distribuição das vias de adaptação por categorias	51

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Valores dos fatores empíricos n utilizados na definição do <i>RCCI</i>	20
Tabela 2. Resumo das narrativas dos cenários <i>Shared Socioeconomic Pathways</i> – SSPs. Adaptado de Riahi <i>et al.</i> (2017)	21
Tabela 3. Vias de adaptação as mudanças climáticas	28
Tabela 4. Quantidade de áreas protegidas de acordo com cada grupo	34
Tabela 5. Áreas protegidas classificadas como alto risco	35
Tabela 6. Áreas protegidas classificadas como baixo risco	35
Tabela 7. Quantidade de áreas protegidas de acordo com cada grupo	42
Tabela 8. Áreas protegidas que exibem alta resiliência	43
Tabela 9. Áreas protegidas que apresentam resiliência moderada	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APA	Área de Proteção Ambiental
ESMs	Modelos Climáticos
FLONA	Floresta Nacional
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GCM	Modelo de Circulação Geral
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPAM	Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia
MONA	Monumento Natural
PA	Parque Estadual
PARNA	Parque Nacional
RCCI	Índice Regional de Mudanças Climáticas
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Nacional
TI	Terra indígena
UC	Unidade de Conservação

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

ha - Hectares

km - Quilômetros

km² - Quilômetros quadrados

mm - Milímetros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 METODOLOGIA.....	15
2.1 Área de estudo	15
2.2 Dados das Áreas protegidas.....	16
2.3 Análise das variáveis risco	18
2.3.1 Método do Inverso Ponderado da Distância (IDW)	23
2.4 Análise da resiliência das áreas protegidas.....	24
2.5 Análise da Vulnerabilidade das áreas protegidas	26
2.6 Vias de adaptação as mudanças climáticas.....	27
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
3.1 Risco climático no Cerrado	29
3.2 Resiliência das áreas protegidas do Cerrado	36
3.3 Vulnerabilidade das áreas protegidas do Cerrado	44
3.4 Adaptação às mudanças climáticas.....	47
4 CONCLUSÃO.....	52
REFERENCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm se mostrado um desafio adicional para a conservação da biodiversidade e dos ecossistemas naturais em todo o mundo (FAJARDO *et al.*, 2023; MÄÄTTÄNEN *et al.*, 2023; MAITI, 2023; SOBTI *et al.*, 2023; HUPKE, 2023).

A preocupação com a manutenção da biodiversidade faz com que estratégias de conservação *in situ* de áreas protegidas sejam estabelecidas. Essas áreas são regiões provedoras de serviços ambientais, que englobam as Unidades de Conservação, Mosaicos, Corredores ecológicos e Terras Indígenas (MMA, 2022).

No bioma Cerrado, as áreas protegidas classificadas como Unidades de Conservação (UCs) representam apenas 8,3% de sua área total, sendo 3% de proteção integral, 5,1% de uso sustentável e 0,2% de sobreposição (SANTOS; CHEREM, 2023). As terras indígenas compreendem aproximadamente a 4,3% do bioma, além de outras regiões em processo de reivindicação e regularização (FUNAI, 2018).

Todavia, o Cerrado desperta especial atenção para a conservação dos seus recursos naturais, visto que, é apontado como um dos 36 *hotspots* mundiais de biodiversidade, apresenta ecossistemas especiais com ampla riqueza biológica e é um dos biomas brasileiros que mais sofreu com a ocupação humana (SCHWAIDA *et al.*, 2023; HOFMANN *et al.*, 2023; BEZERRA *et al.*, 2022).

Segundo Correia Filho *et al.*, (2023), nas últimas décadas, o Cerrado passou por diversas transformações ambientais que estão associadas ao crescimento e expansão agrícola, mudanças no uso e cobertura da terra, desmatamento e alterações climáticas.

As alterações climáticas têm comprometido a biodiversidade do Cerrado (SALMONA *et al.*, 2023; PEREIRA *et al.*, 2022, OLIVEIRA *et al.*, 2020). Hofmann *et al.*, (2021), mencionam que as mudanças climáticas podem ter alto impacto na biodiversidade e podem causar um colapso dos ecossistemas do Cerrado. Dessa forma, a manutenção das áreas protegidas do Cerrado também depende do conhecimento dos impactos das mudanças climáticas sobre essas regiões (PEARCE-HIGGINS *et al.*, 2022).

O Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR6, 2021) menciona que, 3% a 14% das espécies analisadas nos ecossistemas terrestres terão alto risco de extinção com 1,5°C de aquecimento global, chegando a 18% das espécies com 2°C, 29% com 3°C e 39% com 4°C.

O risco de extinção de espécies endêmicas em *hotspots* de biodiversidade, como o Cerrado e a Mata Atlântica, decuplica com um aquecimento entre 1,5°C e 3°C (IPCC AR6,

2021). Conforme aumentam as mudanças climáticas, mais espécies são afetadas, e há elevado potencial de vulnerabilidade ambiental (ASSAD; MARTINS, 2022).

A vulnerabilidade ambiental de áreas biodiversas, associada às mudanças climáticas, refere-se ao modo como as espécies ou populações dentro de um refúgio estão ameaçadas devido às alterações climáticas (DAWSON *et al.*, 2011). A vulnerabilidade ambiental é caracterizada como função de três atributos: risco, sensibilidade e resiliência; no qual o risco está associado às mudanças climáticas, a sensibilidade/susceptibilidade está relacionada à ocorrência de danos, e a resiliência representa a capacidade ou incapacidade de adaptação ao risco (PÖRTNER, 2022; LINDOSO *et al.*, 2016).

De acordo com Dornas *et al.*, (2022), a vulnerabilidade de espécies endêmicas ameaçadas de extinção torna uma região altamente prioritária para a conservação da biodiversidade. Segundo Rosa e Gonçalves (2022), é necessário estabelecer programas de conservação *ex situ* e *in situ*, que garantam a manutenção contínua das áreas protegidas.

Avaliar a vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do Cerrado é fundamental para a elaboração de políticas públicas que atenuem os efeitos das mudanças climáticas no bioma (COLMAN *et al.*, 2021).

Estudos realizados por Ceron *et al.*, (2023) e Santos e Faria (2020), abordam aspectos de vulnerabilidade nas áreas protegidas, incluindo as inseridas nas microrregiões da Chapada dos Veadeiros e Vão do Paranã. Alves-Ferreira *et al.*, (2022), reitera que a vulnerabilidade das áreas é influenciada pelo caráter biogeográfico da região e pelas condições climáticas, sendo necessária a avaliação de ambos aspectos.

Diversos estudos científicos têm utilizado modelos climáticos para avaliar a vulnerabilidade de áreas biodiversas ao redor do mundo (PARAMITA *et al.*, 2023; DASGUPTA *et al.*, 2023; BISWAS; RAHMAN, 2023; PENG, WELDEN; RENAUD, 2023; THIRUMURTHY *et al.*, 2022).

Considerando a vulnerabilidade das áreas protegidas do Brasil, Lapola *et al.*, (2020), evidenciaram que as áreas protegidas inseridas nos biomas Mata Atlântica, Cerrado e Amazônia apresentam alta vulnerabilidade ambiental. Costa *et al.* (2023), avaliaram a Serra do Espinhaço, localizado na porção sudoeste do Cerrado, e enfatizaram a importância em compreender os impactos das mudanças climáticas para estabelecer estratégias de conservação e evitar perda de biodiversidade.

A análise da vulnerabilidade e propostas de adaptação das áreas protegidas mediante as mudanças climáticas pode ser realizada a partir da utilização dos conjuntos de dados de modelos climáticos, utilizando as análises de diferentes cenários de forçamento radiativo, conforme estudo proposto pelo Lapola *et al.*, (2020).

Em síntese, os modelos climáticos são simulações computacionais que utilizam fórmulas matemáticas para recriar os processos químicos, físicos e biológicos que regem o sistema climático da Terra (RASUL *et al.* 2022). Eles são aplicados em diversos estudos de vulnerabilidade às mudanças climáticas (SILVA *et al.*, 2023; CHOWDHURY, 2023; ROY *et al.*, 2023; OLIVEIRA *et al.*, 2023).

O *Coupled Model Intercomparison Project 6* (CMIP6) representa uma iniciativa de grande importância no campo das análises das mudanças climáticas, conduzida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Consiste em um conjunto de modelos climáticos utilizados para investigar e avaliar as transformações ocorridas no clima global. Em contraste com a abordagem adotada anteriormente no CMIP5, o CMIP6 incorpora uma nova metodologia que adiciona cenários socioeconômicos e atualizações das emissões atmosféricas (RCPs) (INPE, 2021).

Estudos têm empregado dados provenientes do CMIP6 para realizar análises de mudanças climáticas em regiões específicas ao redor do mundo, incluindo o Brasil, e regiões localizadas no bioma do Cerrado (SPAREY; COX; WILLIAMSON, 2022; SIQUEIRA *et al.*, 2021; ORTEGA *et al.*, 2021; HIDASI-NETO; GOMES; PINTO, 2022). No entanto, verifica-se uma escassez de avaliações, utilizando modelos climáticos, para áreas protegidas no Cerrado.

Lapola *et al.*, 2022 realizou uma caracterização abrangente da vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas das áreas protegidas do Brasil. No entanto, é importante observar que essa caracterização foi baseada nos dados provenientes do CMIP5, utilizados no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC AR5), sem levar em consideração os dados mais recentes disponíveis no CMIP6 e os cenários socioeconômicos SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*).

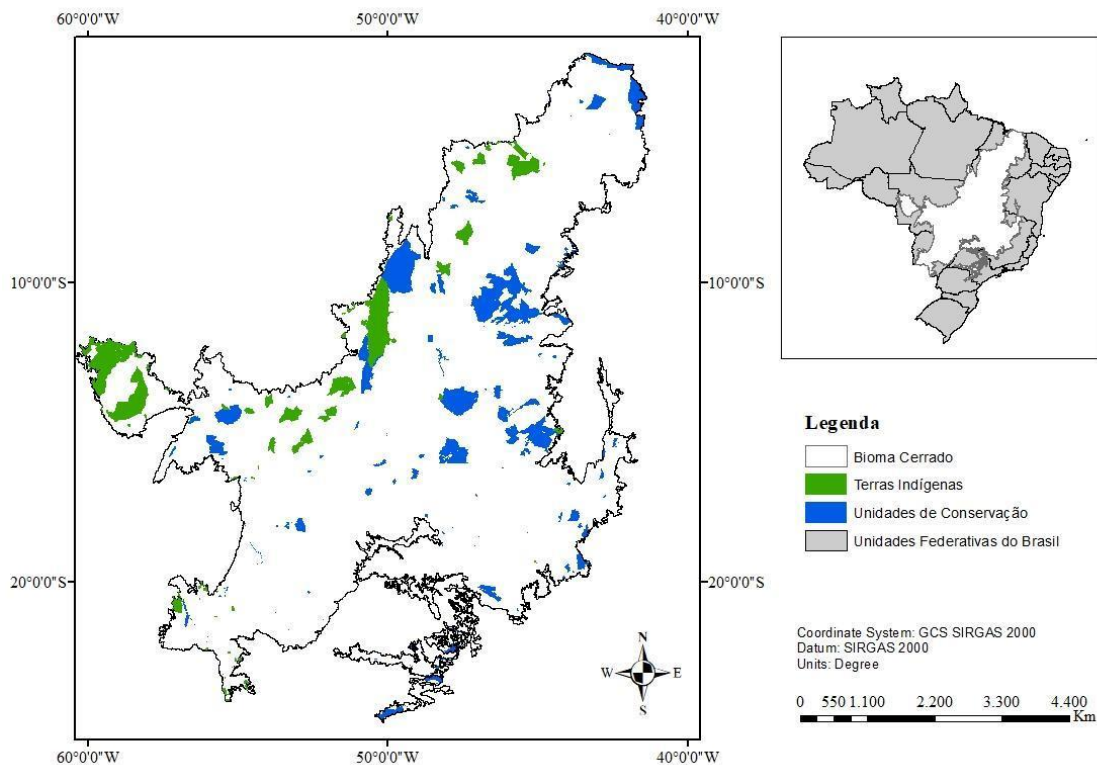
Diante do exposto, o presente estudo tem o objetivo de fornecer uma caracterização atualizada da vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do cerrado brasileiro diante as mudanças climáticas, utilizando os novos cenários socioeconômicos SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*) e dados em alta resolução provenientes do NEXGDDP-CMIP6, como ferramenta de avaliação.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende as Áreas Protegidas (APs) inseridas no bioma Cerrado (Figura 1). O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupa uma área de 2.036.448 km² e sua área contínua incide sobre os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal. O bioma abrange cerca de 23,9% do território nacional e compreende áreas protegidas que estão divididas entre Unidades de Conservação (UCs) e áreas de proteção indígena (API) registradas no banco de dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2022).

Figura 1 – Localização geográfica das Áreas Protegidas do Cerrado



Fonte: Autora

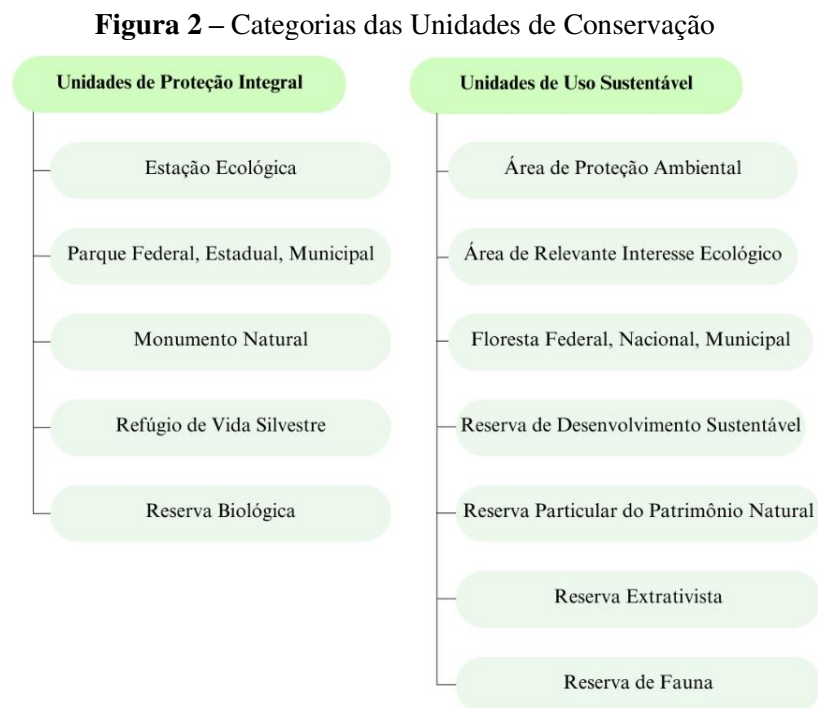
As Unidades de Conservação podem ser Estaduais ou Federais e são subdivididas em duas categorias: Unidades de Proteção Integral, que visam a preservação e são mais restritivas em relação ao uso em seu interior; e Unidades de Proteção de Uso Sustentável, que propõe o

uso adequado dos recursos em interação com as comunidades presentes (SANTOS; CHEREM, 2023).

2.2 Dados das Áreas protegidas

Todos os dados das Áreas Protegidas do Cerrado foram extraídos dos sites do Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA, 2022) e da Fundação Nacional do Índio (FUNAI, 2022). No qual, foram analisadas 94 Unidades Estaduais de Proteção Integral, 83 Unidades Estaduais de uso sustentável, 22 Unidades Federais de Proteção Integral e 74 Unidades Federais de uso sustentável e 118 Terras indígenas, somando um total de 391 unidades analisadas.

As áreas protegidas inseridas no Cerrado englobam UCs e TI. As UCs estão divididas em dois grupos e são compostas por doze categorias, conforme Figura 2.



Fonte: Autora

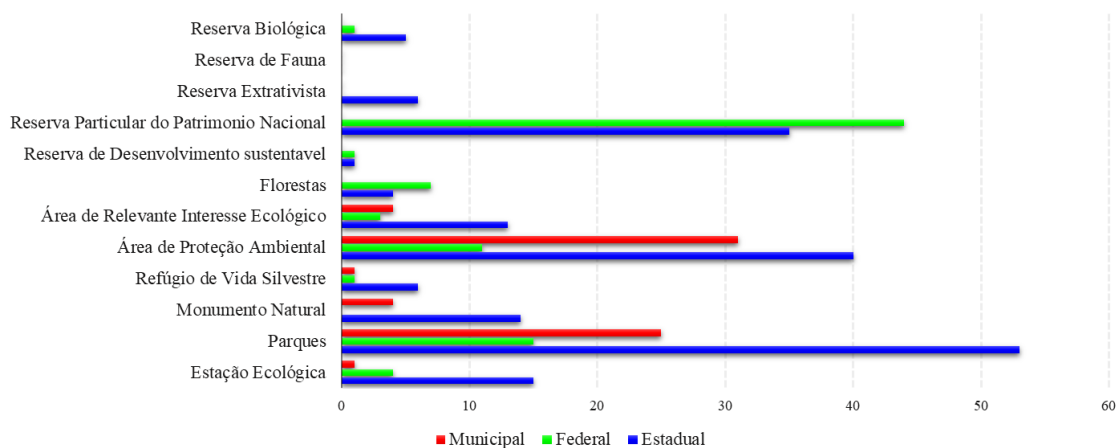
As UCs de Proteção Integral promovem a preservação integral da natureza, a partir de medidas que limitam o uso direto dos recursos naturais e favorecem a utilização indireta. As UCs de Uso Sustentável foram estabelecidas afim de promover equilíbrio entre a conservação da natureza e a exploração sustentável dos recursos naturais.

As áreas protegidas inseridas no Cerrado favorecem a conservação e preservação da biodiversidade, especialmente em regiões que sofrem com as pressões antrópicas, como intenso extrativismo e expansão agrícola (SANTOS; CHEREM, 2023).

O Cerrado abrange um conjunto considerável de UCs, sendo que a quantidade de unidades de conservação de uso sustentável supera as unidades de proteção integral. Ademais, todas as categorias de UCs estão representadas no bioma, com exceção apenas da categoria Reserva de Fauna.

Na Figura 3, estão representadas as categorias das unidades de conservação distribuídas ao longo do bioma Cerrado.

Figura 3 – Distribuição das UCs ao longo do Cerrado



Fonte: Autora

Observa-se que entre as categorias das UCs sobressaem-se os parques estaduais, áreas de proteção ambientais estaduais, reservas particulares do patrimônio nacional federais e estaduais e áreas de proteção ambiental municipal. As UCs classificadas como proteção integral correspondem a 42,02% do total das UCs analisadas, enquanto as UCs de uso sustentável representam 57,98% desse conjunto.

Sob uma perspectiva quantitativa, os parques destacam-se como categoria predominante de UCs no Cerrado. Os parques nacionais tem o objetivo de preservar os ecossistemas e expressam uma contribuição significativa para preservação ambiental (MANETTA *et al.*, 2015). De acordo com Brasil (2002), nos parques são permitidos apenas atividades recreativas, educacionais com enfoque ambiental, e turismo ecológico.

As reservas de desenvolvimento sustentável são minoria no Cerrado, existem apenas duas reservas, uma de âmbito federal e outra estadual. É importante destacar esse aspecto no bioma, uma vez que essa categoria tem objetivo de preservar a natureza e facilitar meios

necessários para reprodução e aprimoramento dos modos de vida das populações tradicionais (MANETA *et al.*, 2015; BRASIL, 2000).

As UCs do Cerrado possuem particularidades, características geofísicas e extensões territoriais diferentes (SANTOS; CHEREM, 2023). A APA Ilha do Bananal/Cantão é a maior área, abrangendo aproximadamente 1.687.000 hectares, enquanto o PARNA Natural Municipal Raimundo Tivotto Mascarelo é a menor área, com apenas 17.26 ha.

É imprescindível observar as mudanças no uso e ocupação da terra das áreas protegidas do Cerrado, visto que, o avanço das atividades agrícolas tem gerado preocupações com a preservação dos habitats naturais e ecossistemas do bioma (CRIVELARI-COSTA *et al.*, 2023).

No decorrer das análises 49 UCs foram excluídas devido à ausência de informações vetorizadas. De acordo com Santos (2018), algumas UCs, especialmente as de caráter municipal, possuem apenas um memorial descritivo como documento oficial, não dispondo de uma representação vetorial do polígono que delimita a área da UC.

A partir do *download* dos *shapefiles* das áreas protegidas, as informações foram colocadas em um banco de dados, no qual, foram separadas e classificadas de acordo com suas características e descrições como nome, categoria, área e localização.

Todos os dados foram processados no *software* Rstudio (versão 4.1.0), e o geoprocessamento das áreas foram realizados por meio do *software* ArcGis 10.8.

2.3 Análise das variáveis risco

Para avaliar a categoria de risco associado às mudanças climáticas nas áreas protegidas foi utilizado o Índice Regional de Mudanças Climáticas (*RCCI*). O *RCCI*, desenvolvido por Giorgi (2006), é um índice que sintetiza dados provenientes das projeções climáticas e, baseado em mudanças nos padrões médios e extremos de temperatura e precipitação, indicam as regiões mais propensas às alterações climáticas.

O *RCCI* é baseado em 4 variáveis climáticas: mudança de temperatura em uma região específica em relação à mudança de temperatura média global (ou *regional warming amplification factor* - *RWAF*, adimensional), alteração na média regional de precipitação (ΔP , % do valor simulado no clima presente), e a mudança na variabilidade interanual da temperatura ($\Delta\sigma_T$, % do valor simulado) e precipitação ($\Delta\sigma_p$, % do valor simulado) (TORRES., MARENGO., 2014).

Segundo Giorgi (2005), o *RCCI* deve ser calculado separadamente para os períodos de seca e os períodos de chuva, todavia, na presente pesquisa, o referencial de cálculo para o *RCCI* levou em consideração todas as estações do ano, conforme definido na Equação 1:

$$RCCI = \sum_{i=1}^4 [n(\Delta P) + n(\sigma_p) + n(RWAF) + n(\sigma_T)]_i \quad (1)$$

em que *i* representa as quatro estações do ano (dezembro a fevereiro - DJF, março a maio - MAM, junho a agosto - JJA e setembro a novembro - SON).

O índice resultante é dado em um valor adimensional e o *n* é um fator empírico que assume os valores de 0, 1, 2 ou 4 a depender da magnitude envolvida. Cada variável assume um valor de *n* conforme descrito na Tabela 1. A partir do valor de cada *n* associado para cada variável, os elementos são somados para encontrar o valor do índice. Nesse sentido, o *RCCI* pode variar de 0 (menor valor relativo de risco climático) a 64 (maior valor relativo de risco climático).

Tabela 1 – Valores dos fatores empíricos *n* utilizados na definição do *RCCI*.

<i>n</i>	(ΔP) %	($\Delta\sigma_p$) %	<i>RWAF</i>	($\Delta\sigma_T$) %
1	< 5	< 5	< 1,1	< 5
2	5 – 10	5 – 10	1,1 – 1,3	5 – 10
3	10 – 15	10 – 20	1,3 – 1,5	10 – 15
4	> 15	> 20	> 1,5	> 15

Fonte: Autora

O *RCCI* foi calculado levando em considerações às mudanças médias climatológicas entre os períodos de 2081-2100 e 1995-2014 projetadas pelos modelos climáticos da 6ª fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (do inglês, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6*), também utilizado no Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC AR6, 2021).

O conjunto de dados do CMIP6 foi analisado em cinco cenários diferentes de forçantes climáticas (SSPs). Os SSPs são cenários compostos de 5 narrativas diferentes (Tabela 2), relativas as mudanças socioeconômicas globais projetadas até 2100, os quais são usadas para derivar cenários de emissões de gases de efeito estufa com diferentes políticas climáticas (RIAHI *et al.* 2017). A essas 5 narrativas são combinadas diferentes metas de forçantes radiativas aproximadas no final do século XXI de 1.9, 2.6, 3.4, 4.5, 6.0, 7.0, e 8.5 Wm⁻², relativo

às condições pré-industriais (GIDDEN *et al.* 2019). Dessa forma, o cenário denominado SSP1-1.9 diz respeito a primeira narrativa, que é coerente com uma forçante radiativa no final do século XXI de $1,9 \text{ Wm}^{-2}$.

Tabela 2: Resumo das narrativas dos cenários *Shared Socioeconomic Pathways* – SSPs. Adaptado de Riahi *et al.* (2017).

SSP1 Sustentabilidade – pegando o caminho verde (baixos desafios para mitigação e adaptação)

O mundo muda gradualmente, mas de forma abrangente, em direção a um caminho mais sustentável, enfatizando um desenvolvimento mais inclusivo que respeita os limites ambientais percebidos. A gestão dos bens comuns globais melhora lentamente, os investimentos em educação e saúde aceleram a transição demográfica e a ênfase no crescimento econômico muda para uma ênfase mais ampla no bem-estar humano. Impulsionada por um compromisso cada vez maior com o cumprimento das metas de desenvolvimento, a desigualdade é reduzida entre os países e dentro deles. O consumo é orientado para baixo crescimento material e menor intensidade de recursos e energia.

SSP2 Meio da estrada (desafios médios para mitigação e adaptação)

O mundo segue um caminho no qual as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam significativamente dos padrões históricos. O desenvolvimento e o crescimento da renda ocorrem de maneira desigual, com alguns países fazendo progressos relativamente bons, enquanto outros ficam aquém das expectativas. As instituições globais e nacionais trabalham, mas fazem um progresso lento, na consecução das metas de desenvolvimento sustentável. Os sistemas ambientais sofrem degradação, embora haja algumas melhorias e, de modo geral, a intensidade dos recursos e o uso de energia diminuam. O crescimento da população global é moderado e se estabiliza na segunda metade do século. A desigualdade de renda persiste ou melhora apenas lentamente e os desafios para reduzir a vulnerabilidade às mudanças sociais e ambientais permanecem.

SSP3 Rivalidade regional – Uma estrada rochosa (grandes desafios para mitigação e adaptação)

Um nacionalismo ressurgente, preocupações com competitividade e segurança e conflitos regionais levam os países a se concentrarem cada vez mais em questões domésticas ou, no máximo, regionais. Os países se concentram em alcançar as metas de energia e segurança alimentar em suas próprias regiões às custas de um desenvolvimento de base mais ampla. Os investimentos em educação e desenvolvimento tecnológico diminuem. O desenvolvimento econômico é lento, o consumo faz uso intensivo de materiais e as desigualdades persistem ou pioram com o tempo. O crescimento populacional é baixo nos países industrializados e alto nos países em desenvolvimento. Uma baixa prioridade internacional para abordar as questões ambientais leva a uma forte degradação ambiental em algumas regiões.

SSP4 Desigualdade – Uma estrada dividida (baixos desafios para mitigação, grandes desafios para adaptação)

Investimentos altamente desiguais em capital humano, combinados com disparidades crescentes em oportunidades econômicas e poder político, levam ao aumento das desigualdades e da estratificação entre os países e dentro deles. Com o tempo, aumenta a lacuna entre uma sociedade conectada internacionalmente que contribui para os setores intensivos de conhecimento e capital da economia global e uma coleção fragmentada de sociedades de baixa renda e pouco educadas que trabalham em uma economia de mão de obra intensiva e de baixa tecnologia. A coesão social diminui e o conflito e a agitação tornam-se cada vez mais comuns. O desenvolvimento de tecnologia é alto na economia e nos setores de alta tecnologia. O setor energético globalmente conectado se diversifica, com investimentos em combustíveis intensivos em carbono, como carvão e petróleo não convencional, mas também em fontes de energia de baixo carbono. As políticas ambientais se concentram em questões locais em torno de áreas de renda média e alta.

SSP5 Desenvolvimento movido a fósfil – Tomando a rodovia (altos desafios para mitigação, baixos desafios para adaptação)

Este mundo tem cada vez mais fé em mercados competitivos, inovação e sociedades participativas para produzir rápido progresso tecnológico e desenvolvimento do capital humano como o caminho para o desenvolvimento sustentável. Os mercados globais estão cada vez mais integrados. Também há fortes investimentos em saúde, educação e instituições para aumentar o capital humano e social. Ao mesmo tempo, o impulso para o desenvolvimento econômico e social está associado à exploração de abundantes recursos de combustíveis fósseis e à adoção de estilos de vida com uso intensivo de recursos e energia em todo o mundo. Todos esses fatores levam ao rápido crescimento da economia global, enquanto a população global atinge seu pico e declínio no século XXI. Problemas ambientais locais, como poluição do ar, são gerenciados com sucesso. Há fé na capacidade de gerenciar sistemas sociais e ecológicos de forma eficaz, incluindo geoengenharia, se necessário.

Fonte: Adaptado de Riahi *et al.* (2017).

Foram utilizados dados dos cenários SSPs de 27 modelos climáticos (ESMs) do NEX-GDDP-CMIP6. O conjunto de dados NASA *Earth Exchange (NEX) Global Daily Downscaled Projections (GDDP)*, ou NEX-GDDP-CMIP6, é composto por cenários climáticos globais derivados de simulações do Modelo de Circulação Geral (GCM) realizados no âmbito do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) (EYRING *et al.* 2016) e em cenários de emissões de gases de efeito estufa “Nível 1” conhecidos como Percursos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs) (MEINSHAUSEN *et al.* 2020; O'NEILL *et al.* 2016).

A resolução média das saídas dos ESMs CMIP6 é de 2°x 2° (latitude x longitude). Devido à baixa resolução, usamos o conjunto de dados NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP), que é um conjunto de cenários climáticos reduzidos com correção de viés (Thrasher *et al.*, 2012) derivados do CMIP6 com os quatro SSPs (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5). O conjunto de dados NEX-GDDP permite estudos dos impactos das mudanças climáticas de escala local a regional (THRASHER *et al.*, 2022), com resolução espacial de 0,25° (~ 25 km²).

O RCCI é baseado em quatro variáveis que foram calculadas separadamente para as médias das quatro estações (dezembro a fevereiro, março a maio, junho a agosto e setembro a novembro). As variáveis e estatísticas climáticas foram calculadas nesta ordem: (a) a mudança nas variáveis climáticas foi calculada para cada simulação do modelo, (b) as médias do conjunto

sobre diferentes modelos disponíveis foram calculadas e (c) os quatro cenários de forçamento diferentes foram calculados (TORRES; MARENGO, 2013, 2014).

Os resultados do RCCI foram gerados em formato *raster* e podem variar de 0 (nenhuma mudança climática significativa é projetada em um determinado local) a 64 (mudanças climáticas afetarão fortemente determinada localidade, com base nas quatro variáveis/estatísticas analisadas). Utilizando este índice como entrada do conjunto de dados raster e os *shapefiles* das áreas protegidas, a ferramenta de estatísticas zonais no ArcGIS foi aplicada para calcular o RCCI médio para cada área com microendemias.

Inicialmente foi feito o *download* dos dados diários de precipitação e temperatura utilizando o *site* do Programa Mundial de Pesquisas Climáticas (WRCP) do IPCC e em seguida, foram calculadas as médias climatológicas mensais das variáveis correspondentes a cada modelo e período, e produzido as projeções de mudanças (futuro menos presente). Com base nas médias calculadas foram classificados os valores *n* para cada variável, e posteriormente efetuadas as somas dos fatores *n* para encontrar o *RCCI* utilizando a equação 1. Com o mapa de *RCCI*, executou-se a ferramenta de recorte “*clip*” para utilizar os pixels inseridos na delimitação geográfica do bioma Cerrado e nas áreas protegidas. Foi utilizado a opção *Raster Processing* da caixa de ferramentas *Data Management Tools*.

Os valores de *RCCI* correspondentes as unidades de conservação e terras indígenas foram ajustados e padronizados em um intervalo de 0 e 1 para possibilitar uma posterior comparação entre os valores de risco e de resiliência. Dessa forma, utilizou-se para padronização a função $\{[x - x_{\text{mínimo}}(x)] / [\text{máximo}(x) - \text{mínimo}(x)]\}$.

Segundo Torres *et al.*, (2012) o *RCCI* é amplamente aceito na literatura, tendo em vista que seus resultados levam em consideração dados de um conjunto de diversos modelos climáticos e é um índice que se mostra bastante eficiente para identificar regiões cujas mudanças climáticas serão mais intensas. Ademais, o *RCCI* assemelha-se a outro índice muito utilizado, o *Climate Change Index* desenvolvido por Baettig *et al.* (2007).

2.3.1 Método do Inverso Ponderado da Distância (IDW)

As áreas protegidas apresentam extensão territorial distintas que variam de 1 hectare até 2 milhões de hectares. Tendo em vista que a dimensão do *pixel* atribuído a cada valor de risco (ou resolução horizontal da grade dos modelos climáticos) correspondente a uma área de aproximadamente 2.780 hectares, fez-se necessário utilizar uma metodologia capaz de

representar a média de risco para as áreas que apresentavam extensão territorial maior que 2.780 hectares.

Para chegar a um valor médio de risco nessas áreas protegidas maiores foi aplicado o método do Inverso Ponderado da Distância (IDW), utilizando os valores dos *pixels* inseridos na delimitação geográfica de cada área protegida e os *pixels* do seu entorno, no raio de 20 km, utilizando a ferramenta de geoprocessamento *buffer*.

A interpolação utilizando o IDW é um método amplamente utilizado na avaliação do comportamento de distribuição de dados. É um interpolador determinístico, que representa integralmente os pontos amostrais e leva em consideração a vizinhança local (FATTORINI *et al.*, 2023; SOBJAK *et al.*, 2023).

Inicialmente os pixels foram convertidos em pontos para adequar ao procedimento de interpolação utilizando a ferramenta *Interpolation* inserida na caixa de ferramentas da *Geostatistical Analyst Tools* do ArcGis. Posteriormente foi aplicado o interpolador IDW, utilizando como dados de entrada os valores dos *pixels* do *RCCI* e dados de saída os limites do polígono delimitados de acordo com a área correspondente de cada AP.

A partir da interpolação foram gerados mapas temáticos indicando a abrangência e distribuição dos valores de risco ao longo da área protegida. Para caracterizar o risco de cada área extraiu-se os resultados da interpolação nos campos *Symbolology* e *Classification*, no qual, foi obtido o valor médio dos dados interpolados.

2.4 Análise da resiliência das áreas protegidas

O termo resiliência foi introduzido na literatura ecológica por Holling (1973), sendo definido como a quantidade de perturbação que um ecossistema pode suportar sem modificar seus processos naturais e estruturais. Também compreendido como o tempo em que um ecossistema demora pra retornar ao seu estado inicial após sofrer perturbação.

A análise da resiliência das áreas protegidas foi feita a partir da avaliação do comportamento da vegetação no período de 1990 a 2021. No qual, foram observadas as regiões que sofreram alterações e o percentual de variação da cobertura vegetal.

Para avaliar a dinâmica da vegetação no decorrer desse período foram utilizados os dados de uso e ocupação da terra da plataforma MapBiomas versão 7.1. O MapBiomas é um projeto de Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da terra do Brasil, que reúne uma rede colaborativa nas áreas de sensoriamento remoto, biomas, usos da terra, sistemas de informações geográficas e ciência da computação. O projeto utiliza processamento em nuvem e

classificadores automatizados, desenvolvidos e operados, a partir da plataforma *Google Earth Engine* que permite gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil (MAPBIOMAS, 2022).

Os dados de *shapefiles* e classes de cobertura vegetal das áreas protegidas do Cerrado foram extraídos diretamente do *toolkit* do MapBiomias preparado no *Google Earth Engine*. No qual, foi executada a opção “*run*” para rodar o *toolkit* de mapas de uso e cobertura da terra, transições e qualidade do mosaico. Em seguida foi selecionada a região “mapbiomas-brazil” utilizando a coleção 7.1, e, selecionadas as tabelas correspondentes as áreas protegidas.

A partir do *download* dos dados de cada área protegida, observamos que a plataforma disponibiliza diversas classes como Floresta, Formação Natural não Florestal, Agropecuária, Área não Vegetada e Mangue. Todas as classes foram observadas na análise da cobertura da terra das áreas protegidas do Cerrado, todavia, escolhemos apenas a classe Floresta (Formação florestal, formação savânica, mangue e restinga arborizada) para o cálculo da resiliência das áreas, visto que, a influência da resiliência depende essencialmente da variabilidade da perda de cobertura vegetal.

O processamento dos dados de cobertura florestal possibilita a observação do comportamento da vegetação e da distribuição de perdas e ganhos de cobertura vegetal ao longo do período analisado. A medida em que a AP sofre perturbação e perde vegetação conseguimos inferir a resiliência correspondente a cada área analisada (KARIM *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2023; HE, SHI; FU, 2021).

A partir dos valores obtidos das classes de cobertura, as informações correspondentes as unidades de conservação e terras indígenas foram ajustadas e padronizados em um intervalo de 0 e 1. No qual, foi utilizado para padronização a função $\{[x - x_{\text{mínimo}}(x)] / [x_{\text{máximo}}(x) - x_{\text{mínimo}}(x)]\}$ para representar a porcentagem de perdas e ganhos de cobertura em uma unidade comparável com a variável risco.

As áreas protegidas foram categorizadas em diferentes níveis de resiliência, nomeadamente, baixa, moderada e alta resiliência. A classificação baseou-se na extensão da perda de cobertura vegetal nas respectivas áreas. Especificamente, as áreas que apresentaram nenhuma até 25% de perda da cobertura vegetal foram classificadas como de alta resiliência. Aquelas com perda de cobertura vegetal entre 25% e 75% foram classificadas como de resiliência moderada, enquanto as áreas que registraram perda de cobertura vegetal acima de 75% foram consideradas de baixa resiliência.

De acordo com Pinho *et al.* (2020), altos valores de resiliência indicam menor sensibilidade e maior capacidade de adaptação as mudanças climáticas, e baixos valores de

resiliência indicam maior suscetibilidade a eventos de transição para outros níveis estáveis dos ecossistemas.

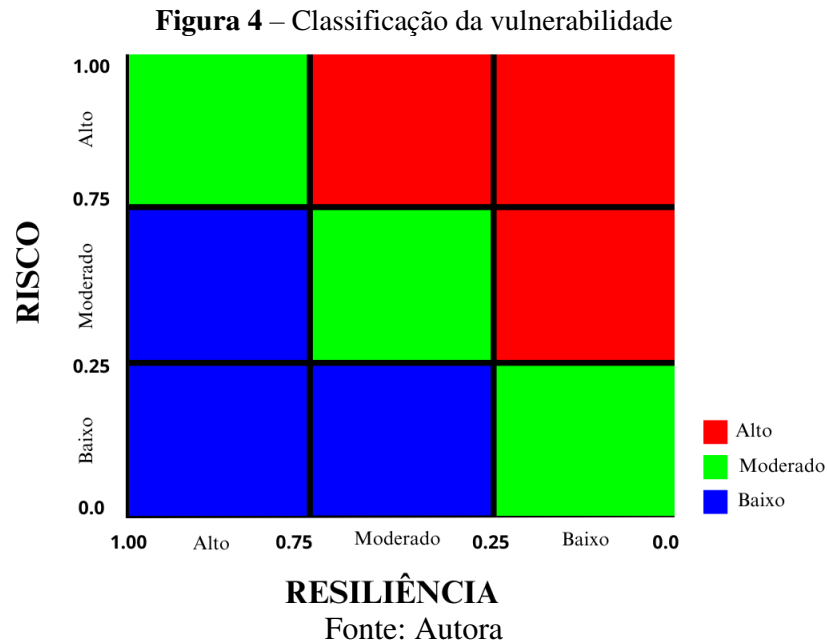
2.5 Análise da Vulnerabilidade das áreas protegidas

A vulnerabilidade é compreendida como “o grau de susceptibilidade de um sistema e sua incapacidade de lidar com os efeitos adversos das mudanças climáticas” (IPCC AR6, 2021). Ela resulta do caráter, magnitude, taxa de mudança e variação climática a que um sistema está exposto, sua sensibilidade e sua capacidade adaptativa.

Para analisar a vulnerabilidade das áreas protegidas dividiu-se os valores de risco e resiliência em 4 partes iguais (25% de cada elemento), ou quartis, baseado na mediana, conforme mencionado por Ferreira (2020). Valores inferiores ao primeiro quartil (Q1) (menores que 25%) foram classificados como baixos, enquanto valores superiores ao terceiro quartil (Q3) (maiores que 75%) foram classificados como altos. Valores entre o primeiro (Q1) e terceiro quartil (Q3) foram categorizados como moderados.

De acordo com Lapola *et al.* (2020), as áreas protegidas com alta vulnerabilidade seriam mais severamente afetadas pelas mudanças climáticas, visto que, as projeções de risco climático são mais severas para essas áreas, que são mais sensíveis e/ou expostas as mudanças e apresentam baixa capacidade de adaptação.

A classificação da vulnerabilidade (baixa, moderada e alta) é determinada por meio da análise comparativa entre as classificações de risco e resiliência (LAPOLA *et al.*, 2020; MAGNESS *et al.*, 2011). Essa comparação cruzada permite identificar o nível de vulnerabilidade de cada área protegida, considerando a interação entre essas duas variáveis, conforme ilustra a Figura 4.



2.6 Vias de adaptação as mudanças climáticas

Baseado nos resultados encontrados nas análises de risco, resiliência e vulnerabilidade, descreveu-se as vias de adaptação as mudanças climáticas para cada área protegida de acordo com a metodologia proposta por Magness *et al.* (2011), que menciona que a capacidade de adaptação de um habitat está relacionada com sua aptidão em migrar de condições deletérias e adversas para microhabitats ou regiões mais adequadas.

As vias de adaptação propostas foram expressas a partir da relação entre as variáveis de risco e resiliência divididas em classes definidas como alto, baixo e moderado. Nesse contexto, considerou-se 4 vias de adaptação: refúgios, manutenção do ecossistema, adaptação natural e transições facilitadas (Magness *et al.* 2011).

Para selecionar as vias de adaptação foram observados os níveis de vulnerabilidade de cada área protegida (Tabela 3).

Tabela 3: Vias de adaptação as mudanças climáticas

VULNERABILIDADE	VIA DE ADAPTAÇÃO
Baixo risco e Alta resiliência	Refúgios
Baixo risco e Baixa resiliência	Manutenção do Ecossistema
Alto risco e Alta resiliência	Adaptação Natural
Alto risco e Baixa resiliência	Transições Facilitadas

Fonte: Adaptado de Lapola *et al.*, 2021.

As áreas de baixo risco e alta resiliência às mudanças climáticas foram enquadradas nas vias de refúgio, isso significa que nestas áreas não há necessidade de intervenção, mas, o meio ecológico deve ser preservado para manter a biodiversidade.

As áreas de baixo risco e baixa resiliência foram enquadradas na via de adaptação manutenção do ecossistema. A recomendação dessa via indica que as medidas adotadas deverão promover o aumento na resiliência, fazendo com que haja restauração da área da vegetação degradada.

As áreas de alto risco e alta resiliência foram indicadas para a via de adaptação natural. Para esta via, descreveu-se os detalhes, as condições ambientais e climáticas para avaliar as espécies e descrever a capacidade de adaptação dessas áreas à recuperação ambiental da vegetação degradada.

As áreas protegidas que apresentaram alto risco e baixa resiliência indicou-se a via de adaptação transição facilitada. Para essas condições foram sugeridas a realocação de espécies, alternativas para melhorar a interação entre espécies e promover a restauração das áreas degradadas.

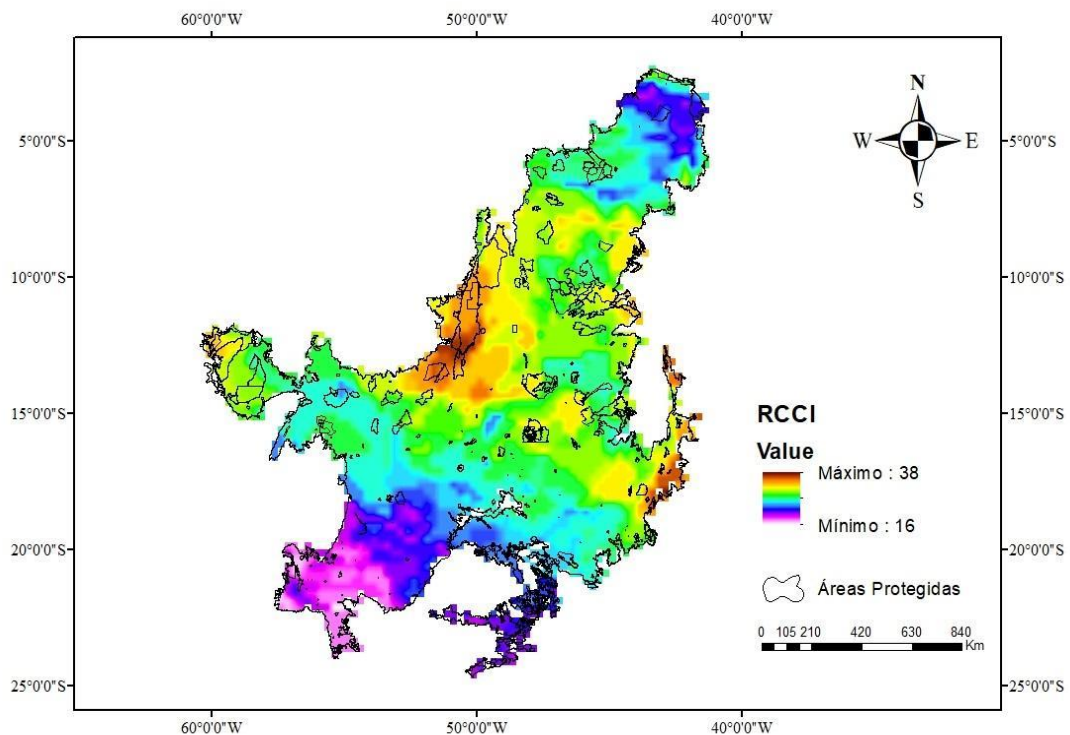
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Risco climático no Cerrado

No presente estudo, a distribuição dos valores de risco associado às mudanças climáticas não são uniformes ao longo do bioma Cerrado. Os valores de *RCCI* variam em um intervalo de 16 a 38. Sendo que, os maiores valores estão distribuídos na região central do Cerrado, enquanto os menores valores estão concentrados nas regiões nordeste e sudoeste do bioma (Figura 5).

As áreas com maiores valores de risco estão nas regiões ocidental do Tocantins, nordeste Mato-grossense, noroeste Goiano, norte de Minas Gerais, e centro-sul Baiano. Todavia, observa-se que todas as regiões do bioma estão sujeitas as alterações climáticas médias e altas.

Figura 5 - Valores de *RCCI* no Cerrado



Fonte: Autora

Considerando as regiões intermediárias inseridas na delimitação geográfica do Cerrado, os valores dos índices foram mais expressivos nas regiões Barra do Garças, Gurupi, Palmas, Porangatu-Uruaçu, Araguaína, Barreiras, Guanambi, Teófilo Otoni, Patos de Minas e Corrente-

Bom-Jesus. Estas regiões estão inseridas nos estados do Mato Grosso, Tocantins, Goiás, Bahia, Minas Gerais, Piauí e Maranhão.

As mudanças climáticas podem afetar os componentes da biodiversidade do Cerrado provocando alterações na temperatura, mudanças nos padrões de precipitação (KOLLING NETO *et al.*, 2023), incêndios florestais, migração de espécies (HIDASI-NETO; GOMES; PINTO, 2023) e desertificação (SILVA *et al.*, 2023).

Os resultados de *RCCI* para as regiões do Cerrado demonstram a fragilidade do bioma frente ao risco de ocorrência de mudanças climáticas. A distribuição do índice permite nortear as áreas mais susceptíveis as alterações nos padrões das variáveis climáticas que desempenham papel crucial na manutenção da estabilidade da vegetação, recursos hídricos, fauna, e demais componentes da biodiversidade.

De acordo com Borges e Layola (2020), as regiões norte e noroeste do Cerrado estão mais suscetíveis a valores anômalos de temperatura e precipitação, enquanto as regiões sul e sudoeste são as menos impactadas por tais anomalias. Além disso, a região oeste também demonstra exposição aos valores extremos de anomalia de temperatura.

Os resultados encontrados neste estudo estão em concordância com modelagens climáticas que indicam alterações nos padrões de temperatura e precipitação do Cerrado (HOFFMAN *et al.*, 2023; SANTOS *et al.*, 2020; VELAZCO *et al.*, 2019; HOFFMAN *et al.*, 2021; PENEREIRO *et al.*, 2018). Alguns modelos climáticos indicam maiores valores de precipitação em determinadas regiões, enquanto outras regiões podem experimentar menores. No entanto, a mediana dos modelos climáticos aponta para uma redução geral na precipitação (ASSAD *et al.*, 2020).

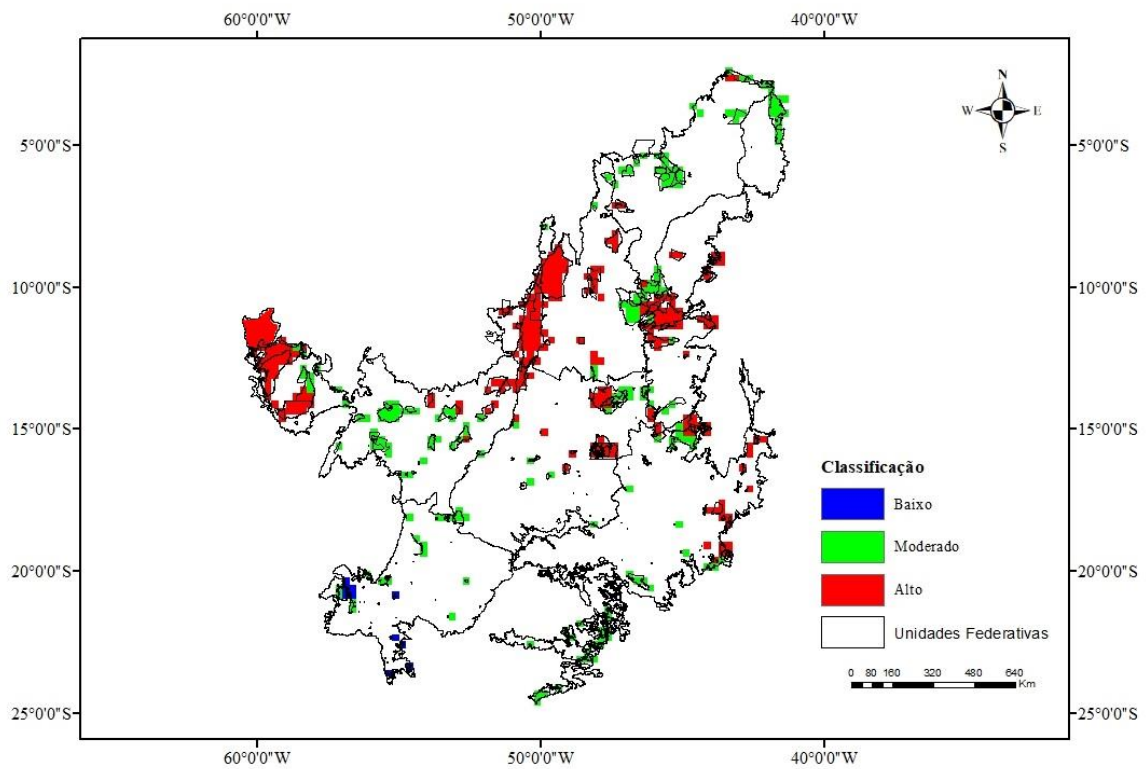
A região central do bioma do Cerrado abriga uma parcela significativa de áreas protegidas. Observa-se que essa região apresenta locais propensos a experimentar mudanças climáticas mais intensas considerando os valores máximos de *RCCI*. A região central compreende aproximadamente 195 áreas protegidas, das quais 173 correspondem as unidades de conservação e 22 correspondem as terras indígenas. Essas áreas apresentam valores de *RCCI* que variam de 28,4 a 37.

As áreas protegidas com os maiores valores de *RCCI* são a Estação Ecológica Mata dos Ausentes, Parque Estadual Serra Negra e Parque Estadual Rio Preto (mesorregião do Jequitinhonha), Refúgio de Vida Silvestre Corixão da Mata Azul e Parque Estadual Araguaia (região nordeste Mato-grossense), Monumento Natural Estadual Várzea do Lageado e Parque Estadual Pico do Itambé (região Metropolitana de Belo Horizonte), e Floresta Estadual do Araguaia (noroeste Goiano).

As terras indígenas que apresentaram maiores valores de *RCCI* foram Taego wa, Krah-Kanela, Utaria Wyhyrna/Irdu Irna e Inawebohona (região Ocidental do Tocantins), Wedez, Cacique Fontoura e Parque do Araguaia (Nordeste Mato-grossense), Pimentel Barbosa (sudoeste do Mato Grosso do Sul).

A partir dos valores de *RCCI* calculados para todo o globo (não mostrado) classificamos as áreas protegidas de acordo com a intensidade do risco: Baixo (≤ 18), Moderado (> 18 e < 29) e Alto (> 29) (Figura 6).

Figura 6 – Distribuição do risco nas áreas protegidas

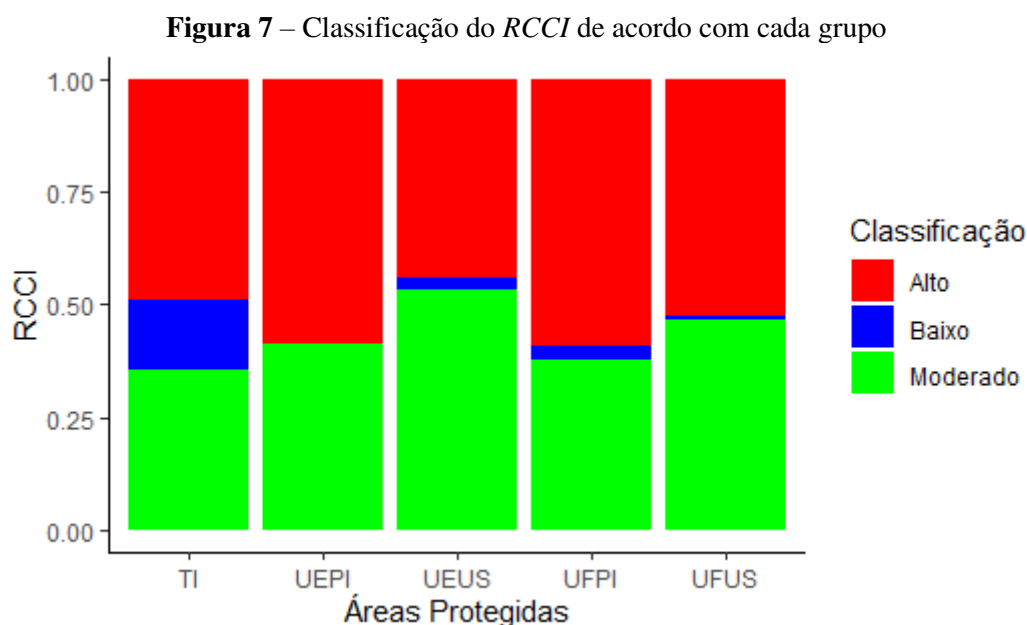


Fonte: Autora

É possível observar que a maioria das áreas protegidas do Cerrado estão classificadas entre os riscos alto e moderado, enquanto as áreas de baixo risco são minoria. Cerca de 175 áreas apresentam alto risco, 184 áreas possuem risco moderado e apenas 32 áreas apresentam baixo risco.

As áreas com alto risco de mudança climática estão distribuídas em regiões específicas dos estados Mato Grosso, Piauí, Goiás, Tocantins, Minas Gerais, Piauí e Maranhão, enquanto as áreas com baixo risco de mudanças climáticas estão concentradas na região sudoeste do estado do Mato Grosso do Sul.

Os valores de *RCCI* das áreas protegidas, ajustados e padronizados em um intervalo de 0 e 1, foram apresentados de acordo com os grupos: unidades estaduais de proteção integral, unidades federais de proteção integral, unidades estaduais de uso sustentável, unidades federais de uso sustentável e terras indígenas (Figura 7).



TI = Terras Indígenas; UEPI = Unidades Estaduais de Proteção Integral; UEUS = Unidades Estaduais de Uso Sustentável; UFPI = Unidades Federais de Proteção Integral; UFUS = Unidades Federais de Uso Sustentável

Fonte: Autora

Tendo em vista todas as áreas inseridas no Cerrado, observa-se que as terras indígenas, unidades estaduais de proteção integral e de uso sustentável apresentam maior quantidade de áreas protegidas susceptíveis ao alto risco de mudanças climáticas.

No entanto, aproximadamente 22,9% das terras indígenas analisadas demonstram um baixo risco em relação às mudanças climáticas, ao passo que as unidades estaduais de proteção integral não apresentam nenhuma área classificada como de baixo risco.

As terras indígenas classificadas como baixo risco estão concentradas nas regiões intermediárias de Dourados e Corumbá, inseridas no estado do Mato Grosso do Sul.

A partir da classificação do risco observou-se a quantidade de áreas protegidas inseridas em cada grupo, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantidade de áreas protegidas de acordo com cada grupo de área protegida

Classificação	TI	UEPI	UEUS	UFPI	UFUS
Baixo	27	0	3	1	1
Moderado	43	45	49	9	38
Alto	48	49	31	12	35
Total	118	94	83	22	74

Fonte: Autora

As unidades de conservação estaduais de proteção integral, representam cerca de 24,04 % de todas as UCs analisadas, e exibem uma gama de valores de risco que variam entre 19 e 38. Aproximadamente 47,9 % dessas áreas estão sujeitas a risco moderado de mudança climática, enquanto 52,1 % delas estão sob alto risco.

As unidades estaduais de uso sustentável exibem uma classificação predominante moderada para o risco e representam 21,23 % de todas as UCs analisadas. Todavia, é o grupo de UCs que apresenta maiores unidades classificadas como baixo risco.

As unidades federais de proteção integral apresentam menor número em quantidade de área protegida, sendo que 54,5 % das áreas estão classificadas como alto risco, 40,9 % como risco moderado e apenas 4,6 % como baixo risco.

As unidades federais de uso sustentável apresentam apenas uma área classificada como baixo risco e as demais estão classificadas entre alto e moderado. Os valores de *RCCI* destas áreas variam de 22 a 35, sendo 35,3 o valor máximo de *RCCI*.

As terras indígenas compreendem o grupo com maior quantidade de áreas protegidas, nos quais, os valores de *RCCI* variam de 16 a 35,1. Os valores correspondentes aos riscos altos nas terras indígenas estiveram compreendidos no intervalo de 29,1 a 35,1, enquanto os valores de risco moderado variaram entre 19 e 28. Já os valores de risco baixo foram encontrados na faixa de 16 a e 18.

A implicação do risco nas áreas protegidas pode variar consideravelmente, dependendo dos usos a que estão submetidas e da dinâmica climática presente. De acordo com Silva *et al.*, (2019), o risco é mais acentuado em áreas que dispõem de microendemismos, tal como o Cerrado. Ademais, o bioma apresenta alto risco de mudança climática por meio de diferentes cenários de forçamento e conjunto de dados provenientes de modelos climáticos (TORRES; MARENGO, 2014).

Para cada grupo de áreas protegidas identificou-se três áreas que apresentaram maior destaque em relação ao alto risco de alterações climáticas (Tabela 5).

Tabela 5 – Áreas protegidas classificadas como alto risco

Área Protegida	RCCI	Grupo
Estação Ecológica Mata dos Ausentes	38	UEPI
Refúgio de Vida Silvestre Corixão da Mata Azul	37	UEPI
Parque Estadual do Araguaia	36,1	UEPI
Área de Proteção Ambiental Meandros do Rio Araguaia	35,3	UFUS
Taego ãwa	35,1	TI
Wedezé	35	TI
Pimentel Barbosa	35	TI
Parque Nacional do Araguaia	34	UFPI
Reserva Particular do Patrimônio Nacional Sonhada	34	UFUS
Reserva Particular do Patrimônio Nacional Bico do Javaés	34	UFUS
Parque Nacional Serra das Confusões	32,1	UFPI
Reserva Biológica da Contagem	32	UFPI

Fonte: Autora

As áreas protegidas listadas na Tabela 5 estão inseridas nas regiões nordeste Mato-grossense, Distrito Federal (estado de Goiás), Jequitinhonha (estado de Minas Gerais), sudoeste Piauiense e ocidental do Tocantins. Essas áreas apresentam características e particularidades distintas, sobretudo, sofrem influências climáticas similares de acordo com a região em que estão inseridas.

A Tabela 6 lista as áreas protegidas que exibiram os menores valores do *RCCI*.

Tabela 6 - Áreas protegidas classificadas como baixo risco

Área Protegida	RCCI	Grupo
Dourados	16	TI
RPPN Cara da Onça	17	UEUS
Panambi - Lagoa Rica	17	TI
RPPN Vale do Sol II	18	UEUS
APA Ilhas e Várzeas do Rio Paraná	18	UFUS
RPPN Douradinho	18	UEUS
PARNA da Serra da Bodoquena	18	UFPI
Dourados-Amambaieguá I	18	TI
Aldeia Limão Verde	18	TI
Amambai	18	TI

Fonte: Autora

As áreas protegidas classificadas como baixo risco estão situadas exclusivamente no estado do Mato Grosso do Sul, abrangendo as regiões intermediárias de Campo Grande, Corumbá e Dourados.

As áreas protegidas Dourados, Panambi - Lagoa Rica, Dourados-Amambaipeguá I, Aldeia Limão Verde, Amambai, RPPN Douradinho, APA Ilhas e Várzeas do Rio Paraná, estão inseridas na região de Dourados no estado do Mato Grosso do Sul.

As áreas protegidas PARNA da Serra da Bodoquena e a RPPN Cara da Onça estão inseridas na região de Corumbá, e a RPPN Vale do Sol II na região de Campo Grande. Os resultados apresentados neste estudo sobre o risco climático associado às projeções climáticas sobre o bioma Cerrado estão em concordância com vários estudos presentes na literatura. Por exemplo, projeções de mudanças climáticas para o ano de 2050 apontam que as alterações climáticas terão um impacto significativo no conjunto de savanas localizado na região central do Cerrado brasileiro (COSTA-COUTINHO *et al.*, 2022), mesmo considerando cenários otimistas, como o RCP 4.5, é previsto que ocorram mudanças nos padrões de habitat e composição florística em uma escala macrorregional, no qual, afetarão a distribuição e a diversidade das espécies presentes nesse ecossistema.

Projeções climáticas realizadas por Reis *et al.* (2019), demonstraram que a distribuição da espécie *Connarus suberosus* no bioma Cerrado será impactada negativamente pela diminuição das áreas propícias para sua subsistência, considerando todos os cenários de emissão RCP. Além disso, destacaram que apenas as regiões sul e leste serão favoráveis a manutenção dessa espécie.

De acordo com Hidas-Neto *et al.*, (2019), as projeções climáticas sugerem uma diminuição na riqueza de espécies em todas as áreas do Cerrado, com destaque para a região sul do bioma, onde ocorre uma tendência de homogeneização biótica devido à extinção de espécies nativas e à expansão de espécies exóticas.

Estudo realizado por Machado e Gonzalez (2021), sobre as regiões do Mato Grosso, revelou uma tendência linear de diminuição do volume de precipitação desde a década de 2000 em algumas áreas específicas do nordeste do estado. As tendências observadas sugerem possíveis alterações no ciclo natural da biosfera, que regula a interação entre a vegetação e o clima. (MUNDIAL, 2023).

As análises da modelagem do nicho ecológico do Cerrado realizadas por Ribeiro *et al.* (2019) e as projeções climáticas associadas, indicaram que as regiões norte e nordeste do bioma podem ser impactadas por potenciais aumentos de temperatura. Essas condições climáticas

adversas podem acarretar em efeitos negativos tanto na sobrevivência quanto na germinação das espécies vegetais presentes nessas regiões.

De acordo com Ferreira *et al.*, (2022), no cenário futuro é previsto que a maioria das áreas de Cerrado experimentarão aumento de temperatura, o que pode ter impactos significativos no estabelecimento de espécies vegetais em locais específicos.

Dados da coleção do MapBiomas Água (2023), desenvolvidos em parceria com o IPAM, demonstraram que dentre as áreas protegidas que sofreram maior impacto na perda de superfície de água ao longo dos últimos 38 anos destacam-se o Parque Nacional do Araguaia com redução 36% de superfície de água, Parque Estadual do Araguaia com redução de 22% e Refúgio da Vida Silvestre Corixão da Mata Azul com redução de 36%.

Mudanças climáticas, envolvendo alterações de temperatura, precipitação e eventos climatológicos extremos, podem resultar na conversão de regiões previamente adequadas do ponto de vista climático em ambientes inadequados, uma vez que podem exceder as tolerâncias ambientais das espécies (VELAZCO *et al.*, 2019).

Além dos impactos nas espécies vegetais e nos ecossistemas, as mudanças climáticas terão implicações nos habitats de populações tradicionais, e terras indígenas (RIBEIRO; MARTINS; LAYOLA *et al.*, 2018).

De acordo com Miranda 2023, a terra indígena Taego Æwa sofreu impactos significativos devido à conversão dessas áreas em propriedades privadas. A substituição das terras indígenas por propriedades privadas é consequência do interesse na exploração agrícola e da necessidade de exploração de novas terras (ABRAMOVAY, 2020).

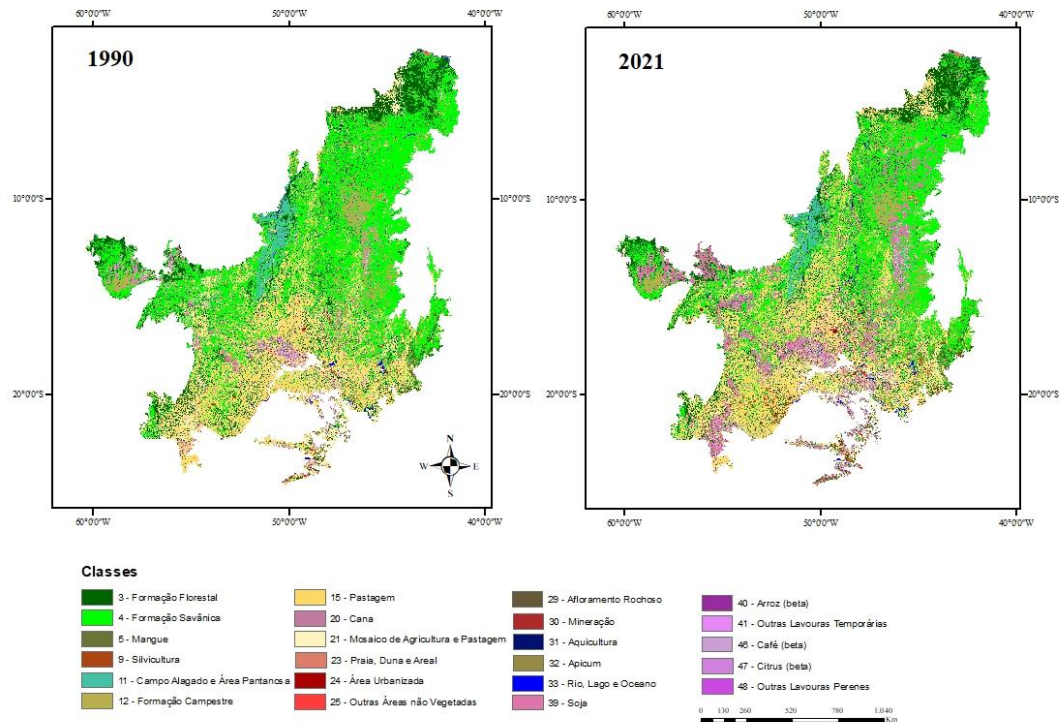
O avanço contínuo das fronteiras agrícolas tem acarretado em ameaças significativas à preservação do ecossistema e à integridade das terras indígenas Wedezé e Pimentel Barbosa, que estão localizadas em uma mesma delimitação geográfica e são adjacentes entre si (BOTANI, 2023).

3.2 Resiliência das áreas protegidas do Cerrado

As áreas protegidas do Cerrado desempenham um papel importante na conservação do bioma. Todavia, é imprescindível observar as mudanças no uso e ocupação da terra nessas áreas, visto que, o avanço das atividades agrícolas tem gerado preocupações com a preservação dos habitats naturais e ecossistemas do bioma (CRIVELARI-COSTA *et al.*, 2023).

No período de 1990 a 2021, foram registradas mudanças significativas no uso e cobertura da terra no bioma Cerrado, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Uso e ocupação da terra do Cerrado nos anos de 1990 e 2021



Fonte: Autora

Ao longo das últimas décadas, observa-se uma perda de vegetação nas regiões extremo oeste baiano, sul goiano, triangulo mineiro, sudoeste do mato grosso do sul, norte e sudeste mato-grossense, e pequenas porções do sudoeste piauiense e sul maranhense.

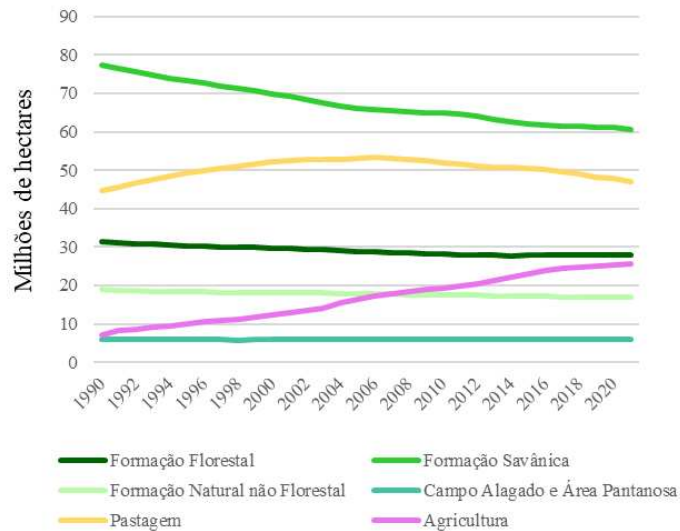
Nos últimos anos, verificou-se uma redução significativa na cobertura vegetal do Cerrado, sendo essa diminuição consequência da conversão de áreas de floresta em agropecuária. Nesse contexto, destaca-se o estado de Goiás, o qual no período analisado apresentou perda de 8,64% de floresta para as atividades agropecuárias.

De acordo com Trigueiro *et al.* (2020), o Cerrado sofreu uma perda estimada em aproximadamente 46% de sua área de vegetação nativa original na última década, o que resultou em uma diminuição significativa de seu território. Além disso, as áreas remanescentes têm sido alvo de expansão do agronegócio, o que tem contribuído para um aumento significativo do desmatamento no bioma (STRASSBURG *et al.*, 2017).

Ao considerar as mudanças observadas nas classes de uso da terra do Cerrado, é possível inferir que o aumento do desmatamento também pode estar relacionado à expansão das áreas destinadas à atividade pecuária, ou seja, às áreas de pastagem (SCHWAIDA *et al.*, 2023).

É evidente uma degradação substancial na vegetação do bioma, caracterizada pela perda de formações florestais e savanas, e aumento de áreas agrícolas. Entre os anos de 2002 a 2020 observa-se uma perda aproximada de 10 milhões de hectares (Figura 9).

Figura 9 – Comportamento das classes de floresta e agropecuária do Cerrado



Fonte: Adaptado do Mapbiomas (2022).

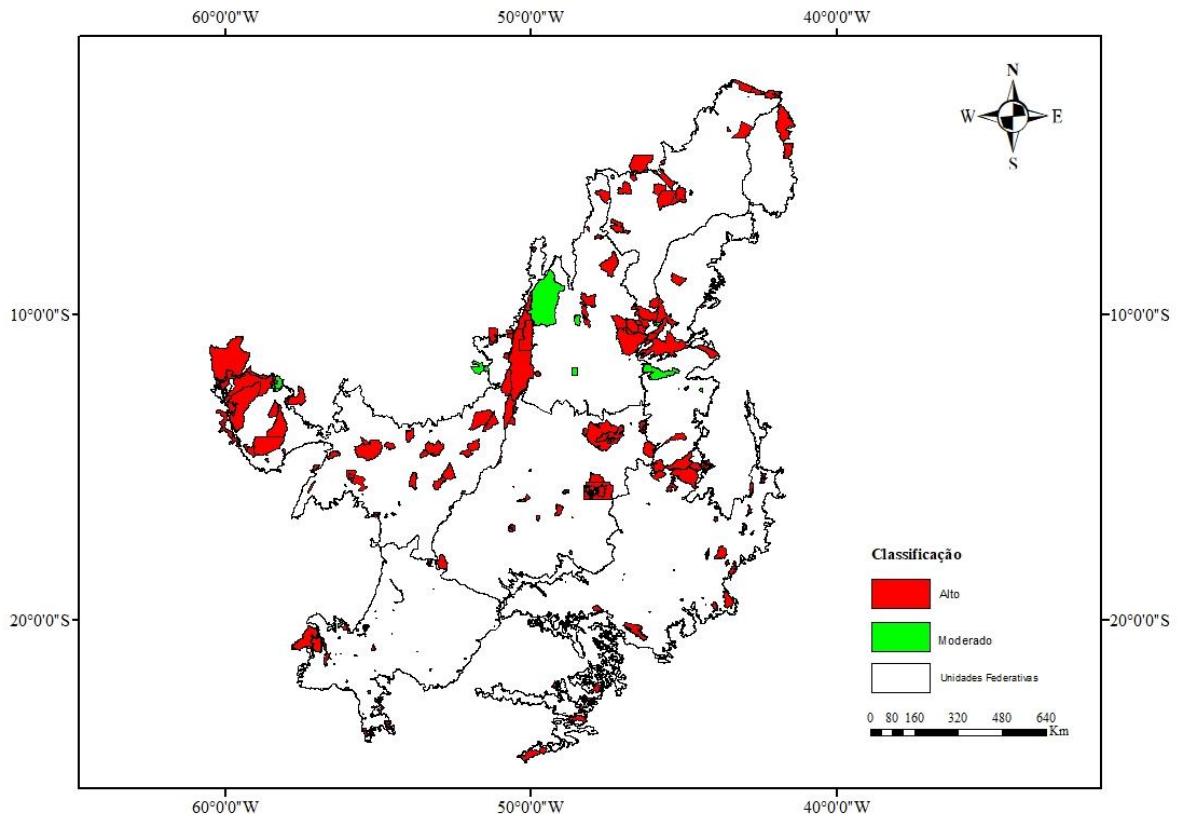
De acordo com Reis *et al.* (2019), as taxas de desmatamento e as subsequentes alterações no uso e cobertura da biodiversidade no Cerrado também são influenciadas pelas condições climáticas e pela capacidade das espécies em resistir à perda e fragmentação de seu habitat (THOMAS *et al.*, 2004; MALCOLM *et al.*, 2006).

A capacidade de resistir a condições adversas caracterizam a resiliência (FALEIRO *et al.*, 2022). Os fatores que influenciam a resiliência das áreas vegetadas englobam as modificações no uso e cobertura da terra, atividades agrícolas, exploração e comércio de recursos florestais e não-florestais, pastagens, mudanças climáticas, erosão e a presença de assentamentos irregulares. (OLIVARES *et al.*, 2021).

A resiliência de uma área protegida pode ser conceptualizada como a capacidade dela se adaptar às mudanças climáticas, sociais e ecológicas ao longo do tempo, com o propósito de assegurar a persistência a longo prazo das populações, comunidades e ecossistemas de alta relevância para a conservação (CUMMING, 2016).

A resiliência das áreas protegidas do Cerrado pode ser observada na Figura 10.

Figura 10 – Distribuição da resiliência das áreas protegidas



Fonte: Autora

A análise da mudança de uso e cobertura da terra das áreas protegidas do Cerrado revela que a resiliência das áreas varia entre alta e moderada ao longo do bioma. Verifica-se que as áreas não apresentam baixa resiliência. Aproximadamente 92,8% das áreas demonstram alta resiliência e apenas 7,2% apresentam resiliência moderada.

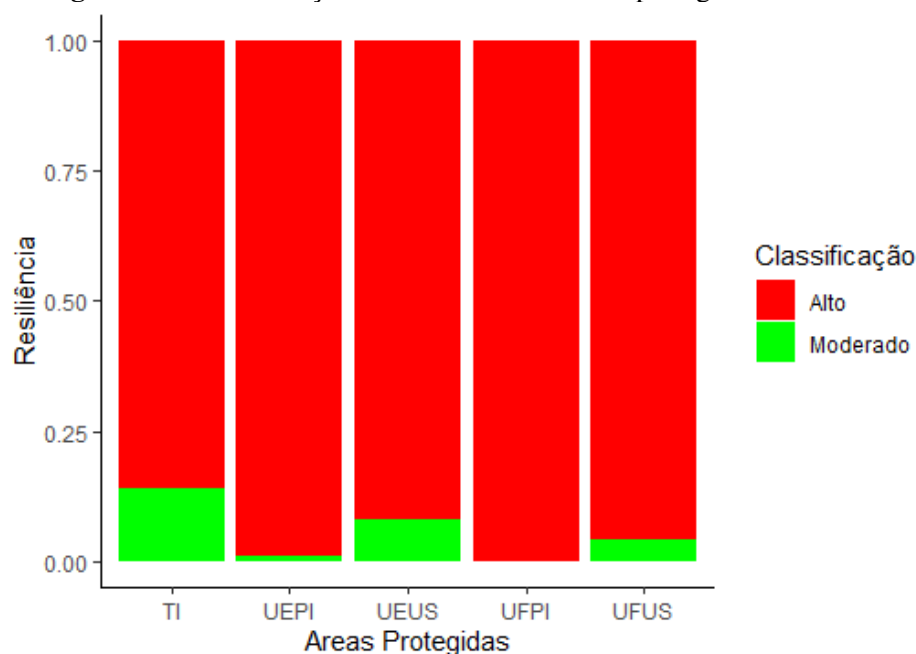
Os resultados encontrados estão em concordância com as análises do Lapola *et al.* (2021), que indicaram que, entre as áreas protegidas do Brasil, as áreas protegidas do Cerrado apresentam apenas resiliência alta e moderada.

As áreas protegidas com resiliência moderada estão distribuídas em todos os estados abrangidos pelo bioma, entretanto, o estado do Mato Grosso do Sul apresenta uma maior concentração de áreas classificadas como moderada. Enquanto as áreas protegidas com alta resiliência concentra-se predominantemente nos estados do Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás, Tocantins e São Paulo.

É importante ressaltar que, entre as áreas analisadas, 202 áreas protegidas apresentaram perda de vegetação para atividades agropecuárias. No entanto, em 157 áreas, houve um aumento na cobertura vegetal, enquanto em 32 áreas, a vegetação permaneceu inalterada ao longo do período analisado.

As áreas protegidas do Cerrado exibem diferentes níveis de resiliência distintos dependendo de seus usos e categorias, como demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Classificação da resiliência das áreas protegidas do Cerrado



TI = Terras Indígenas; UEPI = Unidades Estaduais de Proteção Integral; UEUS = Unidades Estaduais de Uso Sustentável; UFPI = Unidades Federais de Proteção Integral; UFUS = Unidades Federais de Uso Sustentável

Fonte: Autora

É evidente que a maioria das áreas protegidas no bioma Cerrado exibe uma notável capacidade de resiliência, particularmente nas unidades federais de proteção integral, que apresentam uma proporção maior de áreas classificadas como altamente resilientes em comparação com outras categorias.

As terras indígenas é o grupo de áreas protegidas que exibe a maior proporção de áreas com resiliência moderada, no qual, representam aproximadamente 60,2% do total das áreas classificadas como resiliência moderada. Ademais, 14,4% das TI estão classificadas como moderadas e 85,6% das áreas apresentam alta resiliência.

As unidades estaduais de proteção integral apresentam apenas uma área classificada como moderada, enquanto as demais áreas estão classificadas como alta resiliência. A maioria dessas áreas estão localizadas no estado de Minas Gerais, especialmente na região metropolitana de Belo Horizonte. Além dos estados São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, e o Distrito Federal.

As unidades estaduais de uso sustentável apresentam poucas áreas classificadas como resiliência moderada. Aproximadamente 91,6% dessas áreas são categorizadas como alta resiliência, enquanto apenas 8,4% demonstram uma resiliência moderada.

As UCs federais de proteção integral são menos numerosas em comparação com outras áreas protegidas. A resiliência dessas áreas é categorizada exclusivamente como alta e elas estão distribuídas nos estados de Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí e Tocantins.

A maioria das unidades de conservação federais de uso sustentável apresentam alta resiliência, correspondendo a 95,9% do total, enquanto as áreas com resiliência moderada representam apenas 4,1%.

Na classificação das áreas protegidas, foram identificadas 28 áreas de resiliência moderada e 363 áreas com alta resiliência (Tabela 7).

Tabela 7 – Quantidade de áreas protegidas de acordo com cada grupo

Classificação	TI	UEPI	UEUS	UFPI	UFUS
Moderado	17	1	7	0	3
Alto	101	93	76	22	71
Total	118	94	83	22	74

Fonte: Autora

A resiliência das UCs varia de acordo com as esferas estaduais e federais, bem como com as categorias de uso sustentável e proteção integral. Observa-se que as unidades de proteção integral apresentam uma proporção maior de áreas com alta resiliência, em comparação com as de uso sustentável.

De acordo com França *et al.* 2015, a ocorrência de desflorestamento em áreas protegidas varia de acordo com a jurisdição e categoria das mesmas. No Cerrado, as UCs de proteção integral demonstram maior efetividade na mitigação do desmatamento em comparação às UCs de uso sustentável (SANTOS, 2018).

As UCs mais restritivas, como as unidades de proteção integral, estabelecem medidas mais rigorosas de conservação, o que resulta em um desempenho melhor no que diz respeito à conservação ambiental. Por outro lado, as unidades de uso sustentável buscam conciliar os interesses de conservação com atividades humanas, embora nem sempre atinjam plenamente seus objetivos.

De acordo com Powlen *et al.* (2023), os fatores socioeconômicos, como a densidade populacional e a presença de estradas, juntamente com as condições biofísicas como precipitação, elevação, declividade e distâncias dos cursos d'água, desempenham um papel significativo na dinâmica de perda florestal nas áreas protegidas.

É importante salientar que, as áreas protegidas apresentam particularidades que as diferenciam umas das outras, tais como a localização geográfica em que estão inseridas, os tipos de gestão adotados, os aspectos sociais envolvidos e os contextos históricos que levaram à sua criação.

As áreas que se destacaram pela alta resiliência estão listadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Áreas protegidas que exibem alta resiliência

Área Protegida	Grupo
RPPN Reserva Fazenda São Bernardo II	UFUS
RPPN Buraco das Araras	UFUS
Ofayé-Xavante II	TI
Parque Estadual Serra do Sobrado	UEPI
RPPN Parque Botânico dos Kaiapós	UFUS
RPPN Floresta das Águas Perenes	UEUS
Floresta Estadual de Assis	UEUS
Ñande Ru Marangatu	TI
Parque Estadual das Furnas do Bom Jesus	UEPI
Parque Estadual do Sumidouro	UEPI
RPPN Rancho Tucano	UEUS
Parque Nacional da Chapada dos Guimarães	UFPI
Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses	UFPI
Estação Ecológica de Pirapitinga	UFPI
Funil	TI

Fonte: Autora

As RPPN Reserva Fazenda São Bernardo II, Buraco das Araras e Rancho Tucano embora possuam pequena extensão territorial, registraram ganhos significativos na cobertura vegetal ao longo das últimas décadas, expressando um aumento de 200%, 162,5% e 38,9%, respectivamente.

Os parques estaduais Serra do Sobrado, Furnas do Bom Jesus e Sumidouro apresentaram uma substituição de áreas de pastagens por florestas e formações savânicas, resultando em um aumento de vegetação de 75%, 42,01% e 39,1%, respectivamente.

Os parques nacionais da Chapada dos Guimarães e dos Lençóis Maranhenses, que possuem uma extensão territorial maior em comparação aos demais parques nacionais com alta resiliência, registraram um aumento de apenas 2,73% e 1,95%, respectivamente, na cobertura

vegetal. No entanto, observou-se que as demais classes de uso e cobertura do solo permaneceram intactas.

As terras indígenas Ofayé-Xavante II, Ñande Ru Marangatu e Funil, localizadas nos estados de Mato Grosso e Tocantins, apresentaram acréscimo na cobertura vegetal correspondentes a 78, 46,75 e 1,63% respectivamente. Todavia, salienta-se que parcelas de áreas ocupadas por pastagens foram substituídas por mosaicos de uso agrícola.

Embora algumas áreas protegidas tenham apresentado alta resiliência, outras demonstraram moderada resiliência, conforme listado na Tabela 9.

Tabela 9 – Áreas protegidas que apresentam resiliência moderada

Área Protegida	Grupo
Morro Branco	TI
APA Serra da Tabatinga	UFUS
Pilade Rebuá	TI
Floresta Nacional de Cristópolis	UFUS
Kaxixó	TI
APA Lago de São Salvador do Tocantins, Paranã e Palmeirópolis	UEUS
Reserva Extrativista Mata Grande	UFUS
APA Lago de Palmas	UEUS
RPPN Cachoeira da Sucupira	UEUS
Estação Ecológica de Santa Maria	UEPI
Parque Nacional do Araguaia	UFPI

Fonte: Autora

As terras indígenas Morro Branco (região centro-oeste maranhense), Pilade Rebuá (região pantanal sul mato-grossense) e Kaxixó (região central mineira), enfrentaram uma redução significativa na cobertura vegetal, resultando na substituição da cobertura vegetal por áreas urbanizadas, pastagens, usos agrícolas e silvicultura (monocultura).

As unidades federais de uso sustentável APA Serra da Tabatinga (oriental do Tocantins), Floresta Nacional de Cristópolis (extremo oeste baiano) e Reserva Extrativista Mata Grande (oeste maranhense), registraram percentuais de perda de vegetação para atividades como cultivo de soja, lavouras temporárias e pastagem, correspondentes a 65,4%, 55,1% e 38,9%, respectivamente.

As unidades estaduais de uso sustentável APA Lago de São Salvador do Tocantins, Paranã e Palmeirópolis, APA Lago de Palmas e RPPN Cachoeira da Sucupira, inseridas nos estados de Tocantins e Minas Gerais, sofreram substituição da vegetação natural por atividades como produção de soja, mosaicos de uso agrícola e pastagem, e outras lavouras (apresentaram redução de 39,9, 36,9 e 36,4%, respectivamente).

A Estação Ecológica de Santa Maria, localizada na região de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, apresentou redução de 35,2% da cobertura vegetal devido à conversão para áreas de mosaicos de usos agropecuários e formações campestres.

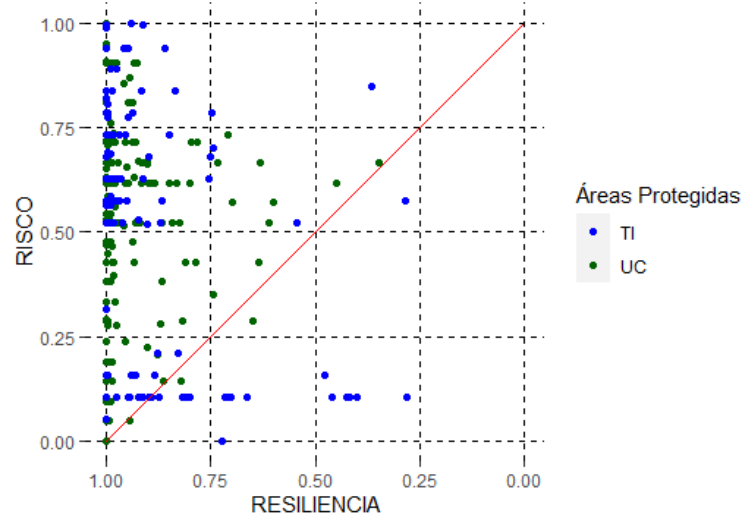
O Parque Nacional do Araguaia, situado na região ocidental do estado do Tocantins, apresentou uma diminuição de 6,32% em áreas com formação florestal. No entanto, observou-se um aumento de 3,18% em formações naturais não florestais, que incluem campos alagados, formações campestres, restingas herbáceas e outras formações não florestais.

3.3 Vulnerabilidade das áreas protegidas do Cerrado

O comportamento da vulnerabilidade das áreas protegidas do Cerrado está intrinsecamente associado aos riscos de exposição às alterações climáticas e a capacidade de regeneração da cobertura vegetal, aspecto da resiliência (VELAZCO *et al.*, 2019).

A medida em que o risco climático aumenta e a resiliência diminui, observa-se um aumento da vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do Cerrado (Figura 12).

Figura 12 – Vulnerabilidade das áreas protegidas do Cerrado



TI = Terras Indígenas; UC= Unidades de Conservação; Linha diagonal = vulnerabilidade
Fonte: Autora

As áreas protegidas estão classificadas em diferentes níveis de vulnerabilidade de acordo com os quartis estabelecidos. As áreas inseridas no quartil 1, valores de risco entre 0 e 0.25 e valores de resiliência entre 0.75 e 1.0, apresentaram baixa vulnerabilidade. As áreas que se encontram no quartil 2, valores de risco e resiliência variando entre 0.25 e 0.75, estão

classificadas como vulnerabilidade moderada. E as áreas pertencentes ao quartil 3, valor de risco de 0.75 e resiliência de 0.25, apresentam alta vulnerabilidade.

O Cerrado apresenta alto risco de sofrer alterações climáticas futuras. Todavia, 92,8% das áreas protegidas apresentam alta resiliência, considerando o comportamento da vegetação e o histórico de uso da terra nos últimos anos. Verifica-se que as áreas protegidas do Cerrado apresentam baixa vulnerabilidade ambiental. No entanto, aproximadamente 15,4% dessas áreas estão classificadas como vulnerabilidade moderada e 0,5% apresentam alta vulnerabilidade.

As áreas identificadas com alta vulnerabilidade foram as terras indígenas Marãiwatsédé, localizada no nordeste mato-grossense, e Carretão I, localizada na região do centro goiano. Essas terras indígenas apresentam alto risco em relação as mudanças climáticas e sofreram uma degradação significativa na cobertura vegetal ao longo das últimas décadas, tendo suas áreas vegetadas (florestas e formações naturais não florestais) substituídas por áreas ocupadas pela agropecuária em 63,5% e 26,5%, respectivamente.

Foram identificadas 60 áreas protegidas com vulnerabilidade moderada, 46 áreas apresentaram alto risco e alta vulnerabilidade, representando 11,8% do total das áreas de vulnerabilidade moderada analisadas, e 14 áreas apresentaram risco e resiliência moderada que corresponde a 3,6% das áreas com vulnerabilidade moderada.

As áreas de vulnerabilidade moderada, distribuem-se entre 32 terras indígenas, 12 unidades estaduais de proteção integral, 9 unidades estaduais de uso sustentável, 6 unidades federais de uso sustentável e 1 unidade federal de proteção integral.

A unidade federal de proteção integral identificada como vulnerabilidade moderada foi o Parque Nacional do Araguaia. As unidades federais de uso sustentável foram a APA Meandros do Araguaia, RPPN Sonhada, FLONA de Cristópolis, APA Serra da Tabatinga, Reserva Extrativista Mata Grande, e RPPN Bico do Javaés.

As unidades estaduais de proteção integral apresentam alto risco e alta resiliência, com exceção apenas da Estação Ecológica de Santa Maria, localizada na região de Ribeirão Preto no estado de São Paulo, que apresenta risco e resiliência moderados.

As unidades estaduais de uso sustentável apresentam, em maioria, risco e resiliência moderados, com exceção apenas da APA Água das vertentes, localizada na região Metropolitana de Belo Horizonte, e a Floresta Estadual do Araguaia, localizada na no noroeste goiano, que apresentam alto risco e alta resiliência.

As terras indígenas destacam-se pelo maior número de áreas protegidas com vulnerabilidade moderada. Muito embora as demais terras indígenas analisadas demonstrem baixa vulnerabilidade, a maioria delas apresentam um nível moderado de resiliência, que

representam uma perda de 25 a 75% das formações florestais naturais e não naturais. Dentre as terras indígenas analisadas, nove registraram uma perda de cobertura vegetal superior a 50% ao longo das últimas décadas.

A redução da cobertura vegetal das terras indígenas, e consequente diminuição da resiliência, é um reflexo da expansão das atividades agrícolas e ocupação antrópica nessas áreas (MARCELINO *et al.*, 2022). A fragmentação ambiental das áreas circundantes às TIs, pressionadas pela expansão agropecuária, pode estar influenciando nas condições ambientais dentro dos limites das TIs (JUNIOR; TRENTIN; SILVA, 2023).

Segundo Silva (2018), as alterações nos usos da terra das áreas protegidas do Cerrado é um fator preocupante, levando em consideração a taxa de degradação da cobertura vegetal e a possibilidade dessas áreas representarem apenas fragmentos isolados de vegetação, com baixa ou nenhuma conexão com outros ecossistemas.

De acordo com Colman *et al.*, (2022), diferentes cenários de projeções futuras para a vegetação do Cerrado apontam que a remoção da cobertura vegetal das áreas protegidas resultará em uma redução de aproximadamente 65% da vegetação remanescente até o ano de 2070.

A vulnerabilidade das áreas protegidas do Cerrado estará sujeita a alterações futuras devido as modificações na cobertura vegetal, levando à redução da resiliência dessas áreas. Essa redução pode acarretar em alterações na classificação das áreas de baixa vulnerabilidade, para vulnerabilidade moderada ou alta. A relação entre os níveis inadequados de proteção ambiental e os danos resultantes da expansão das áreas agrícolas resultarão em aumento na vulnerabilidade das áreas do Cerrado (VELAZCO *et al.*, 2019).

Os resultados encontrados por Velazco *et al.*, (2019), evidenciam que as mudanças climáticas e as crescentes alterações no uso da terra podem acarretar em impactos significativos na flora do Cerrado até os anos de 2050 e 2080, mesmo considerando cenários mais otimistas de mudanças climáticas.

Destaca-se a importância de preservar a cobertura vegetal das áreas protegidas que apresentam alta resiliência no Cerrado e promover melhorias nos usos das áreas protegidas que apresentam baixa resiliência. Especialmente as áreas de uso sustentável, que são mais afetadas pelo desmatamento e ocupação humana (FRANÇOSO *et al.*, 2015).

As áreas de proteção integral são mais eficientes na conservação da vegetação nativa em comparação com as áreas de uso sustentável (ALVES-PINTO *et al.*, 2022). As áreas que adotam uso mais restritivo dos recursos naturais têm a capacidade de promover uma

preservação integral mais significativa. Além disso, a proteção integral da vegetação das áreas protegidas contribui para um aumento da resiliência (SOUZA *et al.*, 2020).

Segundo Santos (2018) e Façoso *et al* (2015), as APs de uso sustentável são mais susceptíveis a perda de habitat quando comparadas com as APs de proteção integral. Nesse contexto, é importante destacar que essas APs devem contar com planos de manejo mais abrangentes e informações técnico-científicas mais robustas para tomada de decisão.

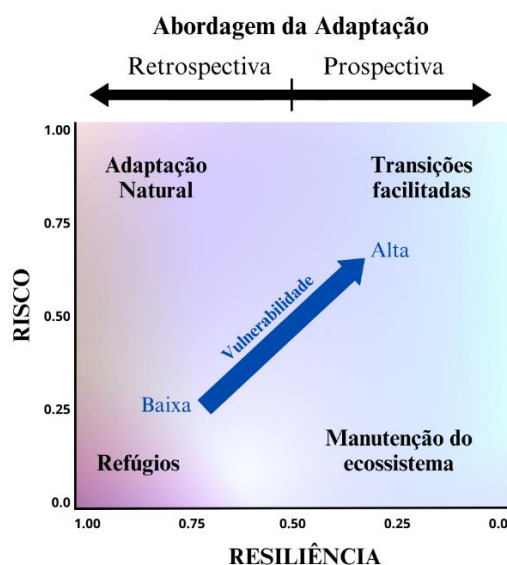
As áreas de uso sustentável e terras indígenas necessitam de especial atenção, visto que, com o aumento da taxa de desmatamento, caracterizado pela substituição da cobertura vegetal por áreas utilizadas na expansão da agropecuária, haverá um aumento significativo na vulnerabilidade dessas áreas. Sendo assim, para minimizar a vulnerabilidade das APs do Cerrado será necessário aumentar a resiliência das UCs de uso sustentável e terras indígenas.

A resiliência desempenha um papel de extrema importância na manutenção da baixa vulnerabilidade das áreas protegidas, mesmo diante de altos níveis de risco, a capacidade de regeneração da vegetação associada à capacidade de suportar as alterações climáticas conferem maior resistência e menor vulnerabilidade (VELAZCO *et al.*, 2019).

De acordo com Cumming *et al* (2016), para elevar a resiliência das áreas protegidas é essencial reconhecer e gerenciar as interações entre os usos da terra das áreas e seu entorno. Além disso, é necessário compreender os serviços ecossistêmicos e promover uma conscientização pública sobre a importância das áreas protegidas e seu papel na minimização de crises ambientais.

3.4 Adaptação às mudanças climáticas

As vias de adaptação sugeridas para as áreas protegidas do Cerrado foram fundamentadas a partir das análises de risco, resiliência e vulnerabilidade, de acordo com a metodologia proposta Mages *et al.*, (2011), conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Vias de adaptação às mudanças climáticas

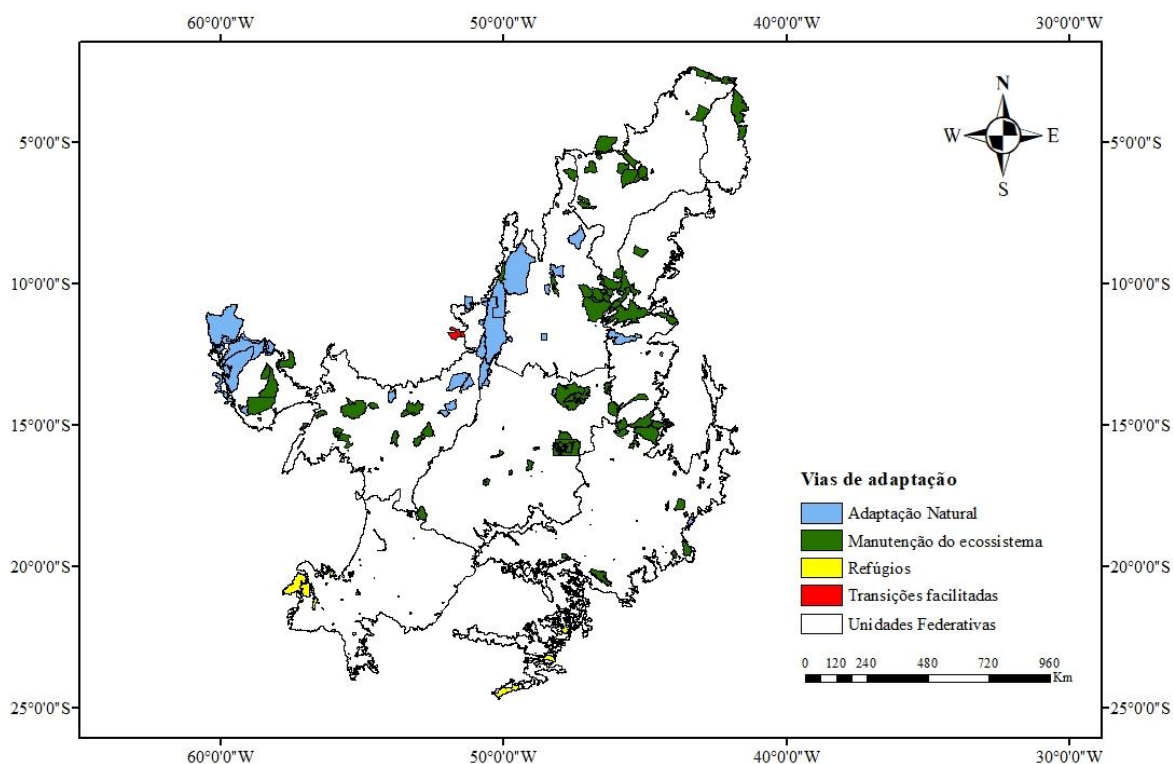
Fonte: Adaptado de Magness *et al.*, (2011)

As áreas que apresentam baixa vulnerabilidade, estratégias de refúgio para as mudanças climáticas seriam necessárias, no qual, essas áreas serviriam como redutos para preservar a ecologia histórica, as condições ambientais e as comunidades de espécies associadas, em cenários de mudanças climáticas (KEPPEL *et al.*, 2012; MAGNESS *et al.*, 2011).

As áreas que apresentam alta vulnerabilidade indicam a necessidade de promover transições facilitadas. Nessas áreas persiste a necessidade de promover reorganizações ecológicas e restauração das áreas degradadas, no qual, seria necessário intervenções e ações governamentais que estejam conscientes com as futuras alterações climáticas (BELOTE *et al.*, 2018). Conforme a vulnerabilidade aumenta, tornam-se necessárias maiores adaptações nas áreas protegidas (LAPOLA *et al.*, 2020).

As áreas que apresentam vulnerabilidade moderada, classificadas como alto risco e alta resiliência e baixo risco e baixa resiliência, são recomendadas para as vias de adaptação natural e manutenção do ecossistema, respectivamente (LAPOLA *et al.*, 2020).

A Figura 14 ilustra a distribuição das áreas protegidas ao longo do bioma Cerrado de acordo com vias de adaptação recomendadas.

Figura 14 – Vias de adaptação para as áreas protegidas do Cerrado

Fonte: Autora

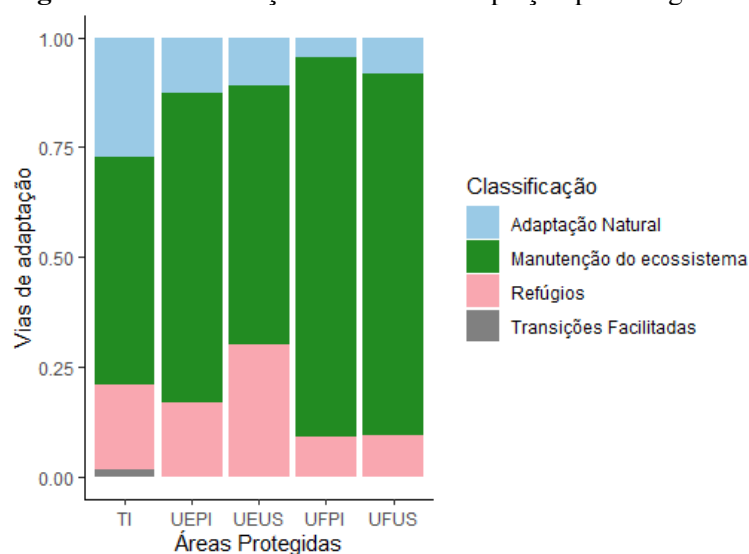
A maioria das áreas protegidas recomendadas para a via de adaptação natural estão concentradas nos estados do Mato Grosso, nas regiões norte e nordeste do estado, e Tocantins, abrangendo as regiões ocidental e oriental. As demais áreas estão distribuídas entre os estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Minas Gerais e São Paulo.

A via manutenção do ecossistema abrange as áreas protegidas que estão situadas nas regiões nordeste e noroeste do Cerrado. A maioria das áreas estão inseridas nos estados de Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais e Tocantins.

As áreas protegidas recomendadas para a estratégia de refúgios possuem menor extensão territorial, tornando-as de difícil visualização no mapa. Mas elas estão inseridas, em sua maioria, nos estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo.

A via de adaptação transições facilitadas compreende apenas duas áreas protegidas, as terras indígenas Carretão I e Marãiwatsédé, que estão localizadas nos estados de Goiás e Mato Grosso, respectivamente.

No Cerrado, a maioria das áreas protegidas foram indicadas para implementação da via de adaptação manutenção do ecossistema, conforme representado na Figura 15.

Figura 15 – Distribuição das vias de adaptação por categorias

Fonte: Autora

A via de adaptação manutenção do ecossistema é indicada a 256 áreas protegidas, o que representa aproximadamente 65,5% das áreas analisadas. Nessa via, 23,8% das áreas são TI, 25,7% são UEPI, 19,2% são UEUS, 7,5% são UFPI e 23,8% são UFUS.

É importante salientar que a recomendação para a via manutenção do ecossistema compreendeu as áreas protegidas que exibiram baixo risco e resiliência moderada, e risco moderado e alta resiliência, uma vez que nenhuma das áreas analisadas apresentou baixa resiliência. Das áreas recomendadas para a via de manutenção do ecossistema, 95,3% apresentam risco moderado e alta resiliência, enquanto apenas 4,7% delas apresentam baixo risco e resiliência moderada. Ademais, todas as áreas com baixo risco e resiliência moderada correspondem as terras indígenas.

Diante disto, evidencia-se a necessidade de promover o aumento da resiliência das áreas protegidas do Cerrado e a restauração das áreas degradadas, especialmente as terras indígenas que apresentam resiliência moderada e as unidades estaduais de proteção integral que apresentam risco moderado. Ademais, deve-se considerar outros elementos que influenciam na resiliência das áreas protegidas, como a ocorrência de incêndios florestais, os quais desempenham papel significativo na degradação da vegetação.

Silva *et al.*, (2022), evidenciaram a relevância de promover a manutenção dos ecossistemas em áreas protegidas que enfrentam incidências de focos de calor, destacando algumas áreas protegidas como Parque Nacional do Araguaia, APA Ilha do Bananal/Cantão e a terra indígena do Parque do Araguaia

A via de adaptação refúgios é indicada para 73 áreas protegidas, o que corresponde a aproximadamente 18,7% das áreas analisadas. Cerca de 25 áreas são UEUS, 23 são TI, 16 são UEPI, 7 são UFUS e apenas 2 áreas são UFPI. De acordo com Magness *et al.*, (2011), áreas de refúgio são fontes potenciais para a biodiversidade de outras reservas em processo de transição. Portanto, é necessário promover a preservação do meio ecológico dessas áreas levando em consideração a aptidão na manutenção da biodiversidade.

No Cerrado, as áreas que apresentam baixa cobertura vegetal e alta anomalia climática, necessitam de monitoramento das populações para identificar as ameaças atuais e as espécies vulneráveis, e fomentar as áreas de refúgio como estratégia de conservação (BORGES *et al.*, 2020). Todavia, as áreas de refúgio demandam ações de manejo conflitantes, visto que, é necessário garantir a viabilidade das populações e espécies residentes nas áreas e também promover condições apropriadas para o assentamento de novas populações e áreas inadequadas (HOLE *et al.*, 2011).

A via de adaptação natural é indicada para 60 áreas protegidas, o que representa cerca de 15,4% das áreas protegidas analisadas. Entre essas áreas, 32 são terras indígenas, das quais, 90,6% apresentam alto risco e alta resiliência. Ademais, 12 áreas são UEPI, 9 são UEUS, 6 são UFUS e apenas 1 é UFPI. Diante do exposto, será essencial restaurar as a vegetação das áreas degradadas e implementar uma gestão adaptativa para avançar em direção às metas de conservação e combate às mudanças climáticas nas vias mencionadas (LEDEE *et al.*, 2021; MARTINUZZI *et al.*, 2015; GRIFT *et al.*, 2009).

Para estabelecer medidas de adaptação natural mais eficientes será necessário preencher as lacunas científicas relacionadas às incertezas sobre como os ecossistemas e a paisagem das áreas protegidas indicadas irão responder às mudanças climáticas (WURTZEBACH *et al.*, 2019; MAGNESS *et al.*, 2011; HOLTHAUSEN, 2005).

A via de adaptação transição facilitada será indicada para as terras indígenas Carretão I e Marãiwatsédé. Segundo Magness *et al* (2011), regiões que apresentam baixa capacidade de resiliência, mas estão sujeitas a um alto risco de exposição às mudanças climáticas, podem desempenhar um papel importante na promoção da interação entre espécies que necessitam ser realocadas ao facilitar a transição entre elas.

A via de adaptação transições facilitadas devem promover a manutenção das espécies em condições emergentes, permitindo que atuem como áreas subsistentes para a dispersão das espécies em direção a outras áreas e aumento da conectividade da paisagem entre as condições atuais e as futuras (SCHUURMAN *et al.*, 2022).

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por meio da utilização do *RCCI* e os dados de uso e cobertura da terra demonstraram de maneira efetiva a vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do Cerrado brasileiro. Ficou evidente que a vulnerabilidade ambiental das áreas protegidas do bioma varia significativamente com a diminuição da resiliência e aumento do risco climático. Nesse sentido, faz-se necessária a intervenção para reduzir a degradação da vegetação e promover alteração nos usos das terras, especialmente nas unidades de uso sustentável e as terras indígenas.

As terras indígenas do cerrado despertam uma preocupação iminente, visto que essas áreas estão sujeitas a crescentes pressões decorrentes do aumento dos usos de seus territórios, expansão do extrativismo e crescimento populacional. A implementação de medidas mais eficientes que promovam proteção da cobertura vegetal das terras indígenas é fundamental para estabelecer e fortalecer a resiliência dessas áreas frente a tais desafios.

A manutenção da resiliência das áreas protegidas é um fator crucial para garantir a capacidade desses ecossistemas em se adaptarem e se recuperarem de perturbações naturais e antropogênicas. Intervenções excessivas e inadequadas podem comprometer a capacidade de regeneração das áreas protegidas, resultando em perda de biodiversidade.

As sugestões das vias de adaptação apresentadas neste estudo oferecem uma visão abrangente de medidas alternativas que podem ser implementadas para enfrentar os desafios atuais. No entanto, é importante ressaltar que algumas áreas protegidas do Cerrado enfrentam condições de isolamento, o que dificulta a conectividade da biodiversidade entre essas áreas. A fragmentação resultante do isolamento das áreas protegidas impede a livre circulação de espécies e dificulta os fluxos gênicos. Essa falta de conectividade pode reduzir a capacidade adaptativa e eficácia da conservação.

Ademais, os resultados obtidos nesta pesquisa fornecem informações relevantes para embasar a formulação de estratégias de conservação com base na projeção da exposição climática futura. Essas informações servem de alerta para a tomada de decisões relacionadas ao manejo das áreas protegidas do Cerrado brasileiro. Portanto, as informações deste estudo podem subsidiar órgãos ambientais, como o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), na tomada de decisão em relação às Áreas Protegidas inseridas no bioma Cerrado e a vulnerabilidade das áreas perante as mudanças climáticas, e orientar ações direcionadas à proteção e preservação dessas áreas.

REFERENCIAS

- ABRAMOVAY, R. **Amazônia: por uma economia do conhecimento da natureza**. Editora Elefante, 2020.
- ALBUQUERQUE, A. C. S; SILVA, A. G. Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2008., 2008.
- ALVES-FERREIRA, G *et al.* Projected responses of Cerrado anurans to climate change are mediated by biogeographic character. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 20, p. 130-136, 2022.
- ASSAD, E. D et al. **Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado**. 2020.
- ASSAD, E. D; MARTINS, S. C. **Mudança do clima no Brasil**. 2022.
- BAETTIG, M. B; WILD, M.; IMBODEN, D. M. A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 1, 2007.
- BELOTE, R. T. *et al.* Assessing agreement among alternative climate change projections to inform conservation recommendations in the contiguous United States. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 9441, 2018.
- BEZERRA, F. G. S *et al.* Análise espaço-temporal da dinâmica e cenários futuros de pressão antrópica sobre biomas no Brasil. **Indicadores Ecológicos**, v. 137, p. 108749, 2022.
- BISWAS, R. R.; RAHMAN, A. Adaptation to climate change: A study on regional climate change adaptation policy and practice framework. **Journal of Environmental Management**, v. 336, p. 117666, 2023.
- BOITANI, P. **Sir Gawain e il cavaliere verde**. Adelphi Edizioni spa, 2023.
- BORGES, F. J. A; LOYOLA, R. Climate and land-use change refugia for Brazilian Cerrado birds. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 18, n. 2, p. 109-115, 2020.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Plano de Ação Emergencial para o Parque do Araguaia. Brasília. 1994. p56.
- BRASIL. Decreto nº 4.340 de 22 de agosto de 2002. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Assembleia Legislativa do Distrito Federal, 2002.
- BRASIL. Lei n.º 9.985, de 18 de julho de 2000. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Assembleia Legislativa do Distrito Federal, 2000.

CAMPOS, J. O; CHAVES, H. M. L. Trends and variabilities in the historical series of monthly and annual precipitation in cerrado biome in the period 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 157-169, 2020.

CAMPOS, S. G et al. Estação Ecológica Mata dos Ausentes (EEMA), Senador Modestino Gonçalves/Minas Gerais, e seus desafios: análise da vazão e qualidade dos corpos d'água na região do seu entorno. **Geochimica Brasiliensis**, v.33, n.2, 2019.

CAVALCANTI, I. F. A; FERREIRA, N. J. **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. Oficina de Textos, 2021.

CERON, K *et al.* Respostas desacopladas das facetas da biodiversidade impulsionadas pela vulnerabilidade dos anuros às mudanças climáticas e de uso da terra. **Cartas de Ecologia**, 2023.

CHOWDHURY, S. Threatened species could be more vulnerable to climate change in tropical countries. **Science of The Total Environment**, v. 858, p. 159989, 2023.

COLLICCHIO, E; ROCHA, H. R. **Agricultura e mudanças do clima no Estado do Tocantins: vulnerabilidades, projeções e desenvolvimento**. 2022.

CORREIA FILHO, W. L. F *et al.* The assessment of climatic, environmental, and socioeconomic aspects of the Brazilian Cerrado. **Ecological Processes**, v. 12, n. 1, p. 1-12, 2023.

COSTA, T. R. *et al.* Vulnerability of the Cerrado–Atlantic Forest ecotone in the Espinhaço Range Biosphere Reserve to climate change. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 151, n. 3-4, p. 1151-1170, 2023.

COSTA-COUTINHO, JOXLEIDE M *et al.* Climate change effects on marginal savannas from central-north Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, 2022.

CRIVELARI-COSTA, P. M. *et al.* Changes in Carbon Dioxide Balance Associated with Land Use and Land Cover in Brazilian Legal Amazon Based on Remotely Sensed Imagery. **Remote Sensing**, v. 15, n. 11, p. 2780, 2023.

CUMMING, G. S. The relevance and resilience of protected areas in the Anthropocene. **Anthropocene**, 13, 46–56, 2016.

DASGUPTA, S *et al.* Adaptive capacity and vulnerability of the socio-ecological system of Indian Himalayan villages under present and predicted future scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 302, p. 113946, 2022.

DORNAS, T *et al.* Avifauna preliminar da serra geral, região central do Brasil: conservação de aves campestres no bioma Cerrado e a contribuição das brigadas de incêndio no conhecimento da biodiversidade. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 19, n. 1, p. 01-31, 2022.

EYRING, V *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v.

9, n. 5, p. 1937-1958, 2016.

FAJARDO, J *et al.* The performance of protected-area expansions in representing tropical Andean species: past trends and climate change prospects. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 966, 2023.

FATTORINI, L *et al.* Design-based spatial interpolation with data driven selection of the smoothing parameter. **Environmental and Ecological Statistics**, v. 30, n. 1, p. 103-129, 2023.

FERNANDES, G. S. T *et al.* Gross primary productivity by remote sensing in the Serra das Confusões National Park, Piauí, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 29, p. 100890, 2023.

FERNANDES, G. S. T *et al.* Variação interdecadal de elementos climáticos no Estado do Piauí (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 2, 2020.

FERREIRA, A. S. The importance of descriptive analysis. **Rev. Col. Bras. Cir.** 47. 2020.

FERREIRA, F. L. V *et al.* Spatial–Temporal Variability of Climatic Water Balance in the Brazilian Savannah Region River Basins. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1820, 2023.

FERREIRA, R. B *et al.* Combining ecological niche models with experimental seed germination to estimate the effect of climate change on the distribution of endangered plant species in the Brazilian Cerrado. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, p. 283, 2022.

FRANÇOSO, R. D. *et al.* Habitat loss and the effectiveness of protected areas in the Cerrado. Biodiversity Hotspot. **Natureza & Conservação**, v. 13, n. 1, p. 35-40, 2015.

GIDDEN, M. J *et al.* Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. **Geoscientific Model Development**, v. 12, p. 1443-1475, 2019.

GIORGI, F. Climate change hot-spots. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 8, 2006.

GIORGI, F. Climate Change Prediction. **Climatic Change**, v. 73, p. 239-265, 2005.

GRIFFITH, B. *et al.* Climate change adaptation for the US national wildlife refuge system. **Environmental Management**, v. 44, p. 1043-1052, 2009.

HE, J; SHI, X; FU, Y. Identifying vegetation restoration effectiveness and driving factors on different micro-topographic types of hilly Loess Plateau: From the perspective of ecological resilience. **Journal of Environmental Management**, v. 289, p. 112562, 2021.

HIDASI-NETO, J *et al.* Climate change will drive mammal species loss and biotic homogenization in the Cerrado Biodiversity Hotspot. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, n. 2, p. 57-63, 2019.

HIDASI-NETO, J; GOMES, N. M. A; PINTO, N. S. Cerrado native vegetation is a refuge for birds under the current climate change trajectory. **Austral Ecology**, v. 47, n. 8, p. 1622-1635, 2022.

HOFMANN, G. S *et al.* Changes in land cover and atmospheric circulation are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. 2023.

HOFMANN, G. S *et al.* The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, n. 17, p. 4060-4073, 2021.

HOLTHAUSEN, R. S. **Strategies for monitoring terrestrial animals and habitats.** US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005.

HUPKE, K-D. Nature Conservation in Times of Climate Change. In: **Nature Conservation: A Critical Introduction.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 321-341, 2023.

INMET. **Boletim Agroclimatológico Mensal.** v.58, n. 04, 2023.

IPCC AR6 (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, **Climate Change 2021**, 41 pp, 2021.

JUNIOR, E. R. M; TRENTIN, C. B; SILVA, E. B. Expansão de Fronteiras Agrícolas e Transformações no Uso e Cobertura da Terra em Áreas Circunvizinhas a Terras Indígenas No Sudeste Mato-Grossense. **Revista Caminhos de Geografia.** v. 24, n. 91, p. 272–286, 2023.

KARIM, M. R *et al.* The role of protected areas co-management in enhancing resistance and resilience of deciduous forest ecosystem to extreme climatic events in Bangladesh. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116800, 2023.

KEPPEL, G. *et al.* Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, n. 4, p. 393-404, 2012.

KOLLING NETO, A. *et al.* Sensibilidade de vazões às mudanças climáticas do regime de precipitação na América do Sul. **Encontro Nacional de Desastres (3.: 2023: Niterói, RJ). Eventos extremos e sociedade sob a perspectiva das mudanças climáticas [recurso eletrônico].** Porto Alegre: ABRHidro, 2023., 2023.

KROPF, M.S; FERRO, S. L; OLIVEIRA, R. R. Biodiversidade, Sociedades e Estados: lições de cooperação em áreas protegidas transfronteiriças. **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. e45639, 2023.

LEDEE, O. E. *et al.* Preparing wildlife for climate change: How far have we come?. **The Journal of Wildlife Management**, v. 85, n. 1, p. 7-16, 2021.

LINDOSO, D. P.; BURSZTYN, M.; RODRIGUES-FILHO, S. Vulnerabilidade e Adaptação. **O Clima em transe**. Rio de Janeiro: Editora Garamond, 2016.

LIU, L. *et al.* Effects of drought and climate factors on vegetation dynamics in Central Asia from 1982 to 2020. **Journal of Environmental Management**, v. 328, p. 116997, 2023.

MÄÄTTÄNEN, A-M *et al.* Combined threats of climate change and land use to boreal protected areas with red-listed forest species in Finland. **Global Ecology and Conservation**, v. 41, p. e02348, 2023.

MACHADO, C. S. D; GONZALEZ, A. Z. D. VARIABILIDADE CLIMÁTICA NO BIOMA CERRADO DE MATO GROSSO DURANTE AS ÚLTIMAS DÉCADAS. **Revista Equador**, v. 10, n. 2, p. 207-227, 2021.

MAITI, P. K.; MAITI, P. **Biodiversity: perception, peril and preservation**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2023.

MALCOLM, J. R. *et al.* Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. **Conservation biology**, v. 20, n. 2, p. 538-548, 2006.

MANETTA, B. R *et al.* Unidades de conservação. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 1-10, 2015.

MARCELINO, G. L. S; MENGUE, V. P; FARIA, C. S. Análise multitemporal e mudanças no uso e cobertura do solo: um olhar para as terras indígenas no Mato Grosso. **Revista de Geografia**. v.39, n.3, 2022.

MARTINUZZI, S. *et al.* Scenarios of future land use change around United States' protected areas. **Biological Conservation**, v. 184, p. 446-455, 2015.

MEINSHAUSEN, M *et al.* The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 8, p. 3571-3605, 2020

MMA (**Ministério do Meio Ambiente**), 2019. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. MMA, Brasília. Available from <http://www.mma.gov.br/areasprotegidas/cadastro-nacional-de-ucs> (accessed Feb 2023).
MUNDIAL, Grupo Banco. RELATÓRIO SOBRE CLIMA E DESENVOLVIMENTO PARA O PAÍS. 2023.

OLIVARES *et al.* Vulnerabilidad y Resiliencia de Áreas Naturales Protegidas ante Asentamientos Humanos Irregulares. 2021.

OLIVEIRA, A. L *et al.* Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-14, 2023.

OLIVEIRA, P. E *et al.* Climate change and biogeographic connectivity across the Brazilian cerrado. **Journal of Biogeography**, v. 47, n. 2, p. 396-407, 2020.

O'NEILL, B. C *et al.* The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461-3482, 2016.

ORTEGA, G *et al.* Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 15, p. 6713-6735, 2021.

PARAMITA, R *et al.* Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. **Journal of Environmental Management**, v. 330, 2023.

PEARCE-HIGGINS, J. W *et al.* A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. **Ecological Indicators**, v. 136, p. 108690, 2022.

PENEREIRO, J. C *et al.* Distribuições de tendências sazonais de temperatura média e precipitação nos biomas brasileiros. **Revista brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 97-113, 2018.

PENG, Y; WELDEN, N; RENAUD, F. G. A framework for integrating ecosystem services indicators into vulnerability and risk assessments of deltaic social-ecological systems. **Journal of Environmental Management**, v. 326, p. 116682, 2023.

PEREIRA, L. C *et al.* Effects of Cerrado restoration on seasonal soil hydrological properties and insights on impacts of deforestation and climate change scenarios. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, p. 882551, 2022.

PIEPER, V. E. P; PINHEIRO, J. R. Análise dos elementos climáticos e suas influencias em área agrícola na região norte do Mato Grosso. **Revista Mato-Grossense de Geografia**, v. 18, n. 01, p. 69-82, 2020.

PINHO, P.F *et al.* Projeções de resiliência dos biomas brasileiros e riscos socioambientais às mudanças climáticas. **Sustainability in Debate - Brasília**, v. 11, n.3, p. 242-259, 2020.

PÖRTNER, H-O *et al.* **Alterações climáticas 2022: Impactos, adaptação e vulnerabilidade**. Genebra, Suíça: IPCC, 2022.

POWLEN, K. A. *et al.* Identifying socioeconomic and biophysical factors driving forest loss in protected areas. **Conservation Biology**. 00, e14058, 2023.

PROJECT MAPBIOMAS - Collection v.6.0 of Brazilian Land Cover & Use Map Series, accessed on date February 20, 2023 through the link: <http://mapbiomas.org>. Projeto MapBiomas Água – Mapeamento da superfície de água no Brasil (Coleção 1), acessado em 18 de junho de 2023 através do link: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/agua>.

RASUL, F *et al.* Role of Modeling in Assessing Climate Change. **Building Climate Resilience in Agriculture: Theory, Practice and Future Perspective**, p. 269-296, 2022.

REIS, C. R *et al.* Climate Change Influencing the Potential Distribution of a Brazilian Savanna Indicator Species. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019.

REIS, C. R *et al.* Climate Change Influencing the Potential Distribution of a Brazilian Savanna Indicator Species. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019.

RIBEIRO, R. M *et al.* Global warming decreases the morphological traits of germination and environmental suitability of *Dipteryx alata* (Fabaceae) in Brazilian Cerrado. **Acta Botanica Brasilica**, v. 33, p. 446-453, 2019.

RODRIGUES, T *et al.* Detecção de mudanças na cobertura vegetal natural do Cerrado por meio de dados de radar (Sentinel-1A). **Sociedade & Natureza**, v. 31, p. e46315, 2023.

ROLDÃO, A. F; FERREIRA, V. O. Climatologia do estado do Tocantins-Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 59, p. 1161-1181, 2019.

ROSA, V. C.; GONÇALVES, A. C. PETRI. R: A resiliência na preservação de espécies ameaçadas de extinção. **Editora Licuri**, p. 1-13, 2023.

ROY, P *et al.* Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. **Journal of Environmental Management**, v. 330, p. 117187, 2023.

SALMONA, Y. B *et al.* A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 4251, 2023.

SANTOS, C. E. **O Plano de Manejo das Áreas Protegidas do Cerrado é uma Ferramenta efetiva para conter a perda de habitat?**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Conservação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, p. 50. 2018.

SANTOS, D. J *et al.* Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5 °C, 2°C and 4°C. **Sustainability in Debate**, v. 11, n. 3, p. 57-90, 2020.

SANTOS, S. A; CHEREM, L. F. S. Spatial and temporal distribution of Unidades de Conservação in the Cerrado: heterogeneity and structure combined for conservation. **Sociedade & Natureza**, v. 35, 2023.

SANTOS, S. A. **As unidades de conservação no cerrado frente ao processo de conversão**. Dissertação (Geografia) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p.105, 2018.

SANTOS, S. A; CHEREM, L. F. S. Estrutura espacial e temporal das Unidades de Conservação no Cerrado: heterogeneidade combinada em prol da conservação. **Sociedade & Natureza**, v. 35, 2023.

SILVA, L. A. P *et al.* Mapeamento da aridez e suas conexões com classes do clima e desertificação climática em cenários futuros-Semiárido Brasileiro. **Sociedade & Natureza**, v. 35, p. e67666, 2023.