



**MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DESCOBERTO, NA REGIÃO DO CERRADO
ATÉ 2052**

GIOVANNA BARROS FERREIRA

**DISSERTAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DESCOBERTO, NA REGIÃO DO CERRADO
ATÉ 2052**

GIOVANNA BARROS FERREIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr.

ALCIDES GATTO

COORIENTADORA: Profa. Dra.

FABIANA PIONTEKOWSKI RIBEIRO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS
FLORESTAIS**

PUBLICAÇÃO:

BRASÍLIA/DF: 10/2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DESCOBERTO, NA REGIÃO DO CERRADO
ATÉ 2052**

GIOVANNA BARROS FERREIRA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. ALCIDES GATTO, (Departamento de Engenharia Florestal, UnB)
(ORIENTADOR)**

**Profª. Dra. FABIANA PIONTEKOWSKI RIBEIRO, (Departamento de Engenharia
Florestal EFL/UnB)
(COORDINADORA)**

**Prof. Dr. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI, (Departamento de
Engenharia Florestal, UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. Dr. MARCO BRUNO XAVIER VALADÃO, (Centro Multidisciplinar, UFAC)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**Prof. Dr. EDSON EYJI SANO, (Embrapa Cerrados)
(EXAMINADOR EXTERNO; SUPLENTE)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 16 DE OUTUBRO DE 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

Em	Barros Ferreira, Giovanna MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DESCOBERTO, NA REGIÃO DO CERRADO ATÉ 2052 / Giovanna Barros Ferreira; orientador Alcides Gatto; co-orientador Fabiana Piontekowski Ribeiro. -- Brasília, 2024. 44 p.
	Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2024.
	1. Cerrado. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Desmatamento. I. Gatto, Alcides, orient. II. Piontekowski Ribeiro, Fabiana, co-orient. III. Título.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Giovanna Barros Ferreira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Modelagem dinâmica do uso e cobertura do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, na região do Cerrado até 2052.

GRAU / ANO: Mestre / 2024

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir a dissertação de mestrado e para emprestar ou vender somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Giovanna Barros Ferreira
giouvannabarrosf@gmail.com
Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha família, expresso minha mais profunda gratidão e admiração. Foram inúmeros sacrifícios para que eu pudesse alcançar meus objetivos, e este trabalho é mais um testemunho do amor incondicional, dos ensinamentos e dos incentivos constantes que recebi ao longo da minha vida.

Ao meu orientador, Alcides Gatto, agradeço pelos incentivos e pelas contribuições fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal. Sua orientação foi essencial para a concretização deste trabalho.

Ao professor Eraldo, agradeço pelo apoio contínuo, pela disponibilidade, pelo incentivo e pelas valiosas contribuições para minha pesquisa. Sua ajuda foi indispensável.

À professora Fabiana, sou imensamente grata por todo o cuidado, pelas orientações e pelas contribuições significativas que proporcionaram o andamento desta dissertação.

Ao Valderli, agradeço profundamente pelo apoio, pela paciência e pela disponibilidade em contribuir com este trabalho. Sua ajuda foi vital para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todos os meus amigos e colegas pelo suporte inestimável durante esse processo. Obrigada pela compreensão, pelo incentivo e por compartilharem diversos momentos comigo. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

RESUMO

As mudanças no uso e cobertura da terra no Cerrado, impulsionadas pelas atividades agrícolas, converteram cerca de 50% da vegetação nativa do bioma em áreas agrícolas, urbanas e pastagens até 2022, resultando em uma das maiores perdas de vegetação nativa dos biomas brasileiros (25%) entre 1985 e 2022, totalizando 31,9 milhões de hectares antropizados. Técnicas de geoprocessamento, incluindo bancos de dados georreferenciados e modelagem espacial, compõem variáveis essenciais para o monitoramento da expansão agrícola. No presente estudo, projetou-se e simulou-se três cenários futuros de desmatamento (tendencial, otimista e pessimista) usando o software DINAMICA EGO para a Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto até o ano de 2052. O cenário tendencial assumiu a manutenção dos padrões de desmatamento; o cenário otimista considerou a implementação bem-sucedida da legislação ambiental que dispõe sobre áreas protegidas e áreas de preservação permanente (APPs); o cenário pessimista assumiu a falha na implementação da legislação ambiental. Complementarmente, avaliou-se os impactos do desmatamento sobre a vazão, precipitação e evapotranspiração na área de estudo, além dos efeitos das outorgas emitidas para coleta de água para irrigação agrícola e urbana na bacia e período estudado. Os resultados mostraram zonas de desmatamento concentradas nas proximidades das áreas urbanas e fora de áreas protegidas. Nos cenários tendencial e pessimista, estima-se atingir 97,02% e 97,66% de fragmentação da paisagem em fragmentos até 10 ha. No cenário tendencial, está previsto um aumento de 7,69% nas áreas desmatadas até 2052, enquanto o cenário pessimista um aumento de 23,57%. No cenário otimista, estima-se um aumento de 1,78%, assumindo o sucesso da implementação da legislação ambiental. Os resultados desta pesquisa indicam que o desmatamento causou impactos negativos significativos nas vazões dos corpos hídricos na área de estudo. Os resultados podem auxiliar os tomadores de decisão na gestão dos recursos ambientais e hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto.

Palavras-chave: savana brasileira; desmatamento; sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Changes in land use and land cover in the Cerrado, driven by agricultural activities, occupied about 50% of the biome's territory by 2022, resulting in the largest loss of native vegetation (25%) between 1985 and 2022, with 31.9 million hectares anthropized. Geoprocessing techniques, including georeferenced databases and spatial modeling, facilitated the monitoring of agricultural expansion. This study projected and simulated three future deforestation scenarios (business as usual, optimistic, and pessimistic) using DINAMICA EGO software for the Descoberto River watershed until the year 2052. Image processing of the initial and final landscapes was conducted for model input. A transition matrix of landscape change rates was generated, and the model was calibrated and validated. The business-as-usual scenario assumed the continuation of deforestation patterns; the optimistic scenario considered the successful implementation of protected areas and compliance with Permanent Preservation Areas (APPs); the pessimistic scenario assumed the failure of these implementations. Additionally, the following variables were analyzed through statistical tests to verify the impacts of deforestation: flow rate, precipitation, evapotranspiration, and the water use permits issued during the study period. The results showed deforestation hotspots concentrated in non-protected areas or adjacent to urban zones. In the business as usual and pessimistic scenarios, significant vegetation fragmentation was projected, with 97.02% and 97.66% of vegetation fragments comprising up to 10 hectares, respectively. The business-as-usual scenario estimated a 7.69% increase in deforested areas by 2052, while the pessimistic scenario projected a 23.57% increase. The optimistic scenario showed a 1.78% increase, assuming the success of environmental legislation. It was observed that deforestation had negative impacts on water body flow rates. These results can assist decision-makers in managing environmental and water resources in the Descoberto River watershed.

Key-words: brazilian savana; deforestation; remote sensing.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVOS	12
2.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
2.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	13
2.2.	DADOS.....	14
2.3.	PROCESSAMENTO DOS MAPAS DE PAISAGEM INICIAL E	15
2.4.	PROCESSAMENTO DO MAPA DE REGIONALIZAÇÃO.....	15
2.5.	PROCESSAMENTO DAS VARIÁVEIS DO MODELO.....	16
2.6.	MODELAGEM ESPACIAL DO DESMATAMENTO	18
2.7.	CENÁRIOS FUTUROS	21
2.8.	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	22
3.	RESULTADOS.....	23
3.1.	CLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO.....	23
3.2.	PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO	24
3.3.	SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	25
3.4.	CENÁRIOS FUTUROS PROJETADOS	28
3.5.	FRAGMENTAÇÃO DA VEGETAÇÃO	30
3.6.	CORRELAÇÃO ENTRE O DESMATAMENTO E AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS.....	31
4.	DISCUSSÃO.....	32
5.	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
TABELA 1: CLASSES DE USO E COBERTURA DO SOLO EM 2010 E 2022 NA ÁREA DE ESTUDO.	23
TABELA 2: RECLASSIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO EM ÁREAS VEGETADAS E NÃO- VEGETADAS NOS ANOS DE 2010 E 2022 NA ÁREA DE ESTUDO.	24
TABELA 3: MATRIZ DE TRANSIÇÃO GLOBAL E ANUAL DE DESMATAMENTO NO PERÍODO DE 2018 A 2022.	25
TABELA 4: VALIDAÇÃO DO ÍNDICE DE SIMILARIDADE FUZZY NOS DIFERENTES TAMANHOS DE JANELA.	26
TABELA 5: ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS - CORRELAÇÃO DE SPEARMAN.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
FIGURA 1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DESCOBERTO NO DISTRITO FEDERAL E GOIÁS.	13
FIGURA 2: MAPA DAS VARIÁVEIS CATEGÓRICAS E CONTÍNUAS DA ÁREA DE ESTUDO	18
FIGURA 3: ETAPAS DESENVOLVIDAS PARA OBTENÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS E PROJETADOS NO SOFTWARE DINAMICA EGO.	19
FIGURA 4: PROBABILIDADE DE DESMATAMENTO (TRANSIÇÃO DE ÁREAS DE VEGETAÇÃO PARA ÁREAS DESMATADAS NA BACIA DO RIO DESCOBERTO COM BASE NA SÉRIE HISTÓRICA DE 2018 A 2022).	26
FIGURA 5: VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE SIMILARIDADE FUZZY EM RELAÇÃO A DIFERENTES RESOLUÇÕES.	27
FIGURA 6: (A) CENÁRIO TENDENCIAL (B) CENÁRIO OTIMISTA; (C) CENÁRIO PESSIMISTA.	29
FIGURA 7: QUANTITATIVO DE ÁREAS DESMATADAS EM CADA CENÁRIO PROJETADO EM HECTARES.	30
FIGURA 8: A) FRAGMENTAÇÃO DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES CLASSES (HA) ATÉ 2022. B) CENÁRIO TENDENCIAL; C) CENÁRIO OTIMISTA; D) CENÁRIO PESSIMISTA.	31

1. INTRODUÇÃO

As mudanças no uso do solo, seja em nível regional ou global, causam efeitos altamente incertos sobre o clima, dadas as mudanças climáticas recentes e projetadas para o futuro próximo (Hurt et al., 2020; Shivanna, 2022). Atualmente, metade da população mundial enfrenta insegurança hídrica por pelo menos um mês a cada ano (Skea et al., 2022). Os impactos associados às mudanças na frequência e intensidade de extremos, como secas e inundações, afetam a disponibilidade de água para a humanidade e a biodiversidade do planeta (Woodward et al., 2016; Upadhyay, 2020). Preocupações com as mudanças no uso/cobertura da terra surgiram na agenda de pesquisa sobre mudanças ambientais há várias décadas, com a constatação de que os processos da superfície terrestre influenciam o ciclo da água (Yang et al., 2021).

Embora a expansão urbana acelerada sem gestão e planejamento ambiental e a alta atividade industrial contribuam para a crise hídrica (Yang et al., 2021), as atividades agrícolas intensivas têm um impacto ainda maior, sendo a principal pressão sobre os recursos hídricos e interferindo diretamente na produção e na qualidade da água. A interação entre a sociedade e a natureza tem causado mudanças significativas em relação ao uso e cobertura da terra (Peruchi Trevisan et al., 2020), especialmente por meio da supressão de florestas e da ocupação desordenada das áreas de recarga de aquíferos, interferindo diretamente no ciclo hidrológico, reduzindo a capacidade do sistema de "produzir" água e, conseqüentemente, a disponibilidade desse recurso (Martins e Galvani, 2022).

A savana brasileira como é conhecido o bioma Cerrado, representa um ecossistema vasto e diversificado caracterizado por um mosaico de tipos de vegetação (Costa-Coutinho et al., 2020). O Cerrado também é popularmente conhecido como o "berço das águas", uma vez que é o segundo maior domínio morfoclimático do Brasil, e ocupa cerca de 24% do território nacional (Martins e Galvani, 2022). O bioma abrange as nascentes de três importantes bacias hidrográficas sul-americanas (Araguaia/Tocantins, São Francisco e Bacia do Prata), bem como três grandes aquíferos (Guarani, Bambuí e Urucuia).

O Cerrado, apesar de sua importância ecológica e socioeconômica, tem passado por mudanças significativas no uso e ocupação do solo, levando ao aumento das taxas de desmatamento e à substituição de sua vegetação natural por outros usos (Vieira et al., 2021). Inicialmente caracterizado por amplas áreas de vegetação nativa, o avanço da fronteira agrícola e a expansão das atividades agrícolas desempenharam um papel fundamental na modificação desse cenário (Oliveira et al., 2024).

A mudança acelerada no uso do solo no Cerrado gerou impactos significativos na biodiversidade, nos recursos hídricos e no clima regional (Rodrigues et al., 2022).

A perda de habitats naturais contribuiu para a fragmentação dos ecossistemas e a perda de espécies endêmicas (Pompeu et al., 2024), enquanto o desmatamento e a conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas levaram à redução da capacidade de armazenamento de carbono e ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (Bolson, 2018). Dado esse contexto, a busca por estratégias de manejo sustentável da terra e conservação da biodiversidade (Meyfroidt et al., 2022) torna-se essencial para garantir a resiliência e a sustentabilidade de longo prazo do Cerrado.

A expansão da atividade agropecuária no Cerrado leva à fragmentação da paisagem, à perda de habitats e à diminuição da biodiversidade, resultando no declínio dos serviços ecossistêmicos. A conversão de áreas do Cerrado em plantações de soja tem impactado o serviço ecossistêmico de fornecimento de água (Cardoso e Ribeiro, 2023). A bacia hidrográfica é um dos elementos da paisagem que mais vêm sofrendo alterações. Quando analisadas áreas de bacias hidrográficas, a fragmentação pode intensificar os processos erosivos e modificar o regime hídrico, especialmente devido às atividades de desmatamento (Andrade et al., 2020).

No Distrito Federal (DF), as mudanças e ocupações ocorreram de forma intensiva e em um curto período (Vieira et al., 2021). Como resultado, o DF enfrenta uma série de desafios decorrentes da expansão urbana, que estão intrinsecamente ligados ao crescimento demográfico da capital e suas áreas circundantes, bem como à ocupação de locais socioambientalmente inadequados, agravada pelo desmatamento do Cerrado em função do crescimento do agronegócio na região (Pinheiro et al., 2023).

O DF desempenha um papel importante em termos hidrográficos, pois abriga as nascentes de três grandes bacias: Tocantins, Paraná e São Francisco (Campos et al., 2011). No entanto, a quantidade de água disponível é escassa em comparação com as necessidades da crescente população. Isso ficou evidente durante a crise hídrica que atingiu a capital federal em 2017 (Silva et al., 2019). A Bacia do Rio Descoberto possui um papel significativo nesse contexto, sendo o principal reservatório de água do DF.

A gestão e o planejamento hídrico visam organizar as áreas urbanas, considerando as áreas favoráveis para ocupação a fim de garantir o equilíbrio ambiental. Para isso, o estudo das dinâmicas de uso da terra pode ser útil. Assim, modelos geoespaciais podem ser utilizados como uma ferramenta para o planejamento urbano (Medeiros et al., 2024). Identificar e quantificar essas mudanças que produzem impactos ambientais, como o desmatamento, a poluição e as mudanças é fundamental para a tomada de decisões ambientais e nas políticas públicas (Calvin et al., 2023). Isso aumenta a busca

por novas tecnologias que orientem esforços para a conservação (Peruchi Trevisan et al., 2020).

Os recursos hídricos são vulneráveis às mudanças no uso e cobertura do solo, à demanda populacional (Rocha et al., 2020; Marques de Oliveira et al., 2020), e às mudanças climáticas (Anandhi e Kannan, 2018). Deste modo, compreender o potencial para mudanças futuras é uma maneira de minimizar seus impactos (Gomes et al., 2021). A interação entre GIS (Geographic Information System), sensoriamento remoto e modelagem espacial trouxe avanços na avaliação de impactos ambientais (Henríquez et al., 2024). O Dinamica EGO é uma plataforma usada para desenvolver aplicações de geomodelagem, sendo utilizada internacionalmente desde 1998 (Rodrigues e Soares-Filho, 2018). Ela tem sido empregada em modelagem de emissões de carbono, desmatamento, perda de biodiversidade, urbanização, mudanças no uso da terra e mudanças climáticas (Cheng et al., 2020; Ferreira et al., 2019; Piontekowski et al., 2019).

Pesquisas desenvolvidas sobre uso e cobertura do solo usando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento têm proporcionado avanços significativos na gestão territorial e na avaliação de impactos sobre os recursos naturais (Henríquez et al., 2024). Essas técnicas permitem a realização de diversas análises e obter resultados eficientes em um curto espaço de tempo e a custos reduzidos (Schleich et al., 2023). Os resultados obtidos dessas pesquisas possibilitam o desenvolvimento de alternativas que promovem o desenvolvimento sustentável, favorecendo a preservação ambiental e a harmonização da interação humana com a natureza (Feng et al., 2023).

Os resultados obtidos a partir desses modelos têm o potencial de oferecer insights sobre as consequências das ações humanas sobre os recursos naturais, permitindo a identificação de padrões de mudança ao longo do tempo e do espaço (Liu et al., 2024). Utilizando dados históricos como base, espera-se proporcionar uma compreensão detalhada dos possíveis impactos futuros. Essas análises, focadas nos efeitos potenciais sobre os recursos naturais, podem orientar a tomada de decisões relacionadas ao uso consciente da terra na região (Dutra et al., 2022).

1.1 Objetivos

Avaliar os impactos da dinâmica de uso e cobertura do solo, gerando modelos preditivos para o desmatamento até 2052 na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Para isso, os objetivos específicos são:

- 1) Desenvolver diferentes cenários futuros do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica

do Rio Descoberto até o ano de 2052, e

- 2) Avaliar os impactos do desmatamento passado e futuro nos recursos hídricos da bacia e na fragmentação da vegetação nativa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto (BHRD), objeto deste estudo, pertence à Região Hidrográfica do Paraná, com aproximadamente 30% de seu território no estado de Goiás e os 70% restantes localizados na porção ocidental do Distrito Federal (Figura 1). A bacia é uma das mais populosas da região, com 20% de seu território ocupado por áreas urbanas.

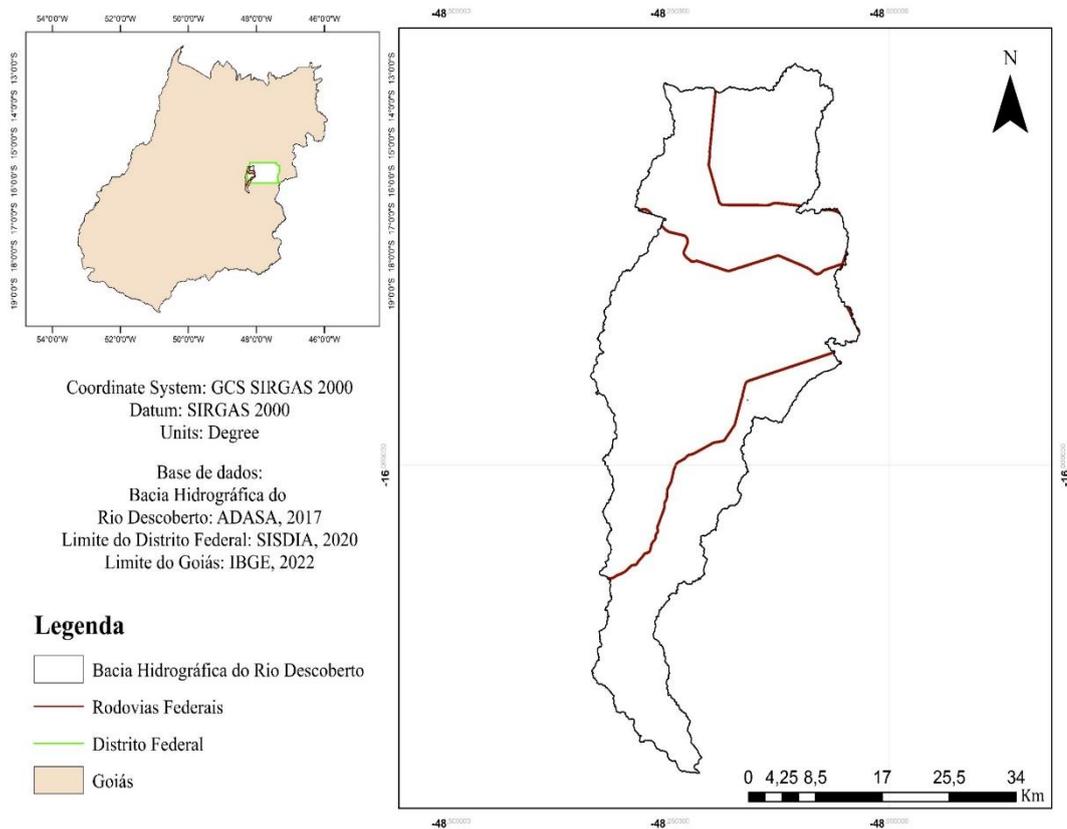


Figura 1: Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto no Distrito Federal e Goiás.

Fonte: Autor.

Na região do Distrito Federal (DF), os cursos d'água são caracterizados por uma estrutura edáfica com baixa disponibilidade de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, e também apresentam baixa condutividade. Geralmente, esses corpos d'água são cercados por vegetação de mata ciliar,

enquanto os rios maiores são margeados por florestas ripárias. No DF, existem várias bacias hidrográficas, incluindo as dos rios Preto, Maranhão, São Bartolomeu, Alagado/Ponte Alta, Ribeirão Samambaia e Descoberto.

O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é classificado como tropical de altitude do tipo Cwa, com uma precipitação média anual de 1.477,4 mm. O período chuvoso ocorre entre os meses de outubro e março, período durante o qual as temperaturas diminuem e a umidade aumenta (Silva et al., 2019). Durante o período de 2010 a 2022, a temperatura média mensal variou entre 21 e 22°C.

Os solos predominantes na região de estudo são o Latossolo Vermelho e o Cambissolo, que são bem estruturados e apresentam boa drenagem. No entanto, quando expostos, esses solos são altamente suscetíveis à erosão (Santos, 2018). De acordo com dados do MapBiomas (2023), o uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto é predominantemente agrícola, com presença de formações florestais e áreas não vegetadas.

O território da bacia inclui unidades de conservação federal de proteção integral e de uso sustentável que cobrem sua área total ou parcialmente. São elas: a Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto, a Área de Proteção Ambiental do Planalto Central, o Parque Nacional de Brasília e a Floresta Nacional de Brasília.

2.2 Dados

Os dados temáticos contendo os limites da Bacia do Rio Descoberto, bem como suas sub-bacias e rios, foram obtidos do banco de dados do sítio na rede mundial de computadores (internet) da Agência Nacional de Águas (ANA); os limites das áreas protegidas foram adquiridos no site do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio); os tipos de solo presentes na BHRD foram extraídos do banco de dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa); e as estradas foram obtidas do banco de dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em uma escala de 1:250.000 e no sistema de coordenadas UTM. Dados sobre desmatamento para a região de estudo foram extraídos da Coleção 8.0 do MapBiomas.

Modelos Digitais de Elevação derivados de imagens do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), fornecidos pela Embrapa, foram usados para produzir mapas de inclinação e altitude que cobrem toda a área de pesquisa. O mapa temático das Áreas de Preservação Permanente (APPs) foi obtido do banco de dados fornecido pela Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável

(FBDS).

Os programas de software utilizados para o processamento e a obtenção dos resultados deste estudo foram o ArcMap® (uma aplicação do ArcGIS®), a plataforma Google Earth Engine e o software DINAMICA EGO. Este último é um programa de modelagem de domínio público desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (Rodrigues e Soares-Filho, 2018).

2.3 Processamento de dados georreferenciados de paisagem inicial e final

Os mapas que representam a área desmatada no início e no final do período analisado foram usados para calcular a taxa média anual de conversão do desmatamento durante o intervalo em questão. Esses mapas, juntamente com as variáveis explicativas do desmatamento, foram utilizados para derivar valores de transição usando a técnica de pesos da evidência.

Na fase de calibração do modelo de desmatamento para os cenários de tendencial e otimista, os mapas correspondentes aos anos de 2018 e 2022 foram usados para representar os estados inicial e final do desmatamento, respectivamente. Esses anos foram selecionados com base na análise do histórico do desmatamento na área de estudo nos últimos anos. A área total acumulada desmatada até o ano de 2022 foi de 87.513 hectares.

Para o cenário pessimista, os dados de entrada iniciais e finais do modelo para o mapeamento do desmatamento foram os anos de 2021 e 2022. Este período foi escolhido com base nos anos com as taxas mais altas de desmatamento na série histórica analisada. Os mapas vetoriais iniciais e finais de desmatamento foram convertidos para o formato *raster* com uma resolução espacial de 30 x 30 m por pixel para toda a área da Bacia do Rio Descoberto.

2.4 Processamento do mapa de regionalização

Para abranger as características locais de toda a área de estudo, foi utilizado um mapa de microbacias da Bacia do Rio Descoberto, em formato *raster* com uma resolução espacial de 30 x 30 m por pixel. Utilizando o mapa de microbacias, a área de estudo foi regionalizada em cada uma das unidades hidrológicas existentes e introduzida no DINAMICA EGO. Essa abordagem permitiu a aplicação de uma sequência de operações em regiões específicas dentro do software, possibilitando a modelagem no contexto local influenciado por fenômenos particulares.

As microbacias, como um todo, compreendem um conjunto de Ottobacias, que são áreas

contribuintes para segmentos da rede hidrográfica, codificadas de acordo com o método Otto Pfafstetter de classificação de bacias. As microbacias usadas neste estudo foram classificadas como nível 8, com base em um sistema que utiliza numeração ascendente a partir dos rios que desaguam diretamente no mar, seguindo seus afluentes de jusante para montante.

2.5 Processamento das variáveis do modelo

Os mapas das variáveis de entrada do modelo foram preparados no ArcGIS® e no Google Earth Engine, convertidos do formato vetorial para raster, com uma resolução espacial de 30 x 30 m por pixel, utilizando o sistema de coordenadas UTM SIRGAS 2000. Para variáveis categóricas estáticas, foram utilizados mapas de vegetação, áreas protegidas e tipos de solo. Para variáveis contínuas estáticas, foram utilizados mapas de distância das estradas primárias e secundárias, distância dos principais rios, APPs, atração urbana, aspecto e declividade.

Para as variáveis de distância das estradas primárias e secundárias, distância dos centros urbanos e distância dos principais rios, a distância euclidiana foi calculada no ArcGIS®, gerando distâncias contínuas para cada variável. Cada pixel recebe um valor específico que representa a distância no mapa em relação ao objeto de referência (estradas, centros urbanos e rios) (Rodrigues e Soares-Filho, 2018).

As variáveis de vegetação, áreas protegidas e tipos de solo foram utilizadas para representar o cenário de uso e cobertura do solo, refletindo a estrutura ecológica e os tipos de solo que podem influenciar a resistência ou a susceptibilidade ao desmatamento. Essas variáveis, além de identificarem áreas prioritárias de conservação, como as unidades de conservação, ajudam a modelar como diferentes tipos de solo e vegetação respondem à pressão por uso.

Enquanto isso, as variáveis de distâncias de estradas primárias e secundárias, principais rios, APPs, atração urbana, aspecto e declividade, proporcionam uma representação detalhada da acessibilidade e do relevo, que são fatores-chave no desmatamento. As distâncias de estradas e centros urbanos, fornecem uma métrica robusta da proximidade a infraestruturas que facilitam a ocupação e exploração do solo. Aspecto e declividade, foram integradas para considerar a influência topográfica, onde áreas mais inclinadas, por exemplo, tendem a ser menos favoráveis ao desmatamento. Essa consideração é fundamental para representar as barreiras físicas naturais do relevo.

Os mapas das variáveis utilizadas como entrada para o modelo de desmatamento futuro na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto é apresentado na Figura 2. Figura 2 O mapa temático de vegetação foi

elaborado a partir da classificação das principais tipologias florestais da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, de acordo com os dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A área de estudo é composta por fitofisionomias do Cerrado, e áreas de tensão ecológica, que, segundo o IBGE, são regiões de contato entre dois ou mais tipos de vegetação, onde as floras se interpenetram, formando comunidades indiferenciadas.

O mapa temático de tipos de solos presente na área de estudo foi construído a partir da base de dados do IBGE das principais classificações de solos. No mapa temático das áreas protegidas foram incluídas as unidades de conservação de uso sustentável e proteção integral que cobrem total ou parcialmente a área da bacia. Para a variável de distância da rede viária que compõe a área da bacia, foram elaborados dois mapas: um com a distância das estradas principais, e outro com a distância de estradas secundárias.

O mapa temático da distância da rede hidrográfica foi elaborado a partir dos principais rios que constituem a bacia. O mapa temático de atração urbana foi desenvolvido com base nas áreas urbanas localizadas na Bacia do Rio Descoberto. Diferentemente dos demais mapas de distância, o mapa de atração urbana contém os maiores valores de pixels próximos às zonas urbanas, que diminuem à medida que se afastam dessas áreas. O mapa temático de aspecto foi elaborado a partir de Modelos de Elevação Digital SRTM da base de dados de relevo e da topografia do Brasil, disponibilizados pela EMBRAPA. O mapa temático de declividade também foi elaborado a partir de Modelos de Elevação Digital SRTM. O mapa de APPs foi desenvolvido a partir dos dados do FBDS, onde foram localizadas as APPs no interior da bacia.



Figura 2: Mapa das variáveis categóricas e contínuas da área de estudo

Fonte: Autor.

2.6 Modelagem espacial do desmatamento

Para realizar o processamento da modelagem espacial e obtenção dos cenários simulados, foram executados alguns procedimentos no *software* (Figura 3). A matriz de transição envolve a estimativa das taxas de mudança da paisagem entre o início e o fim do período de estudo. Neste estudo, as taxas de transição entre áreas com vegetação e desmatamento, foram equivalentes às taxas de desmatamento observadas no período analisado e serviram para projetar o desmatamento em anos futuros.

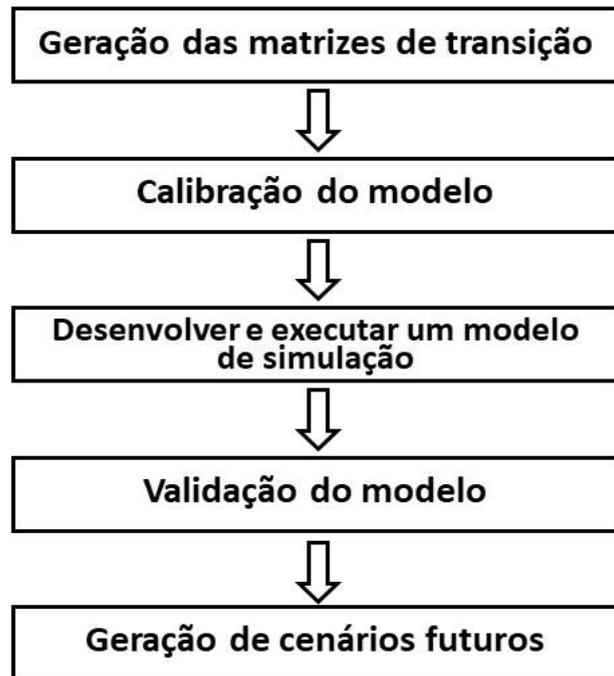


Figura 3: Etapas desenvolvidas para obtenção dos cenários simulados e projetados no software DINAMICA EGO.

Fonte: Adaptado de Soares-Filho et al., (2009).

Para calcular as taxas de transição, foi utilizada a ferramenta "*Determine Transition Matrix*", uma função de modelagem do DINAMICA EGO. Esta ferramenta permite a geração de duas matrizes chamadas "*Single Step*" e "*Multiple Step*" (Piontekowski et al., 2019). A "*Single Step*" refere-se à matriz de transição global, ou seja, ao longo de todo o período analisado, enquanto a "*Multiple Step*" refere-se à matriz de transição anual, gerada em intervalos de tempo durante o período de análise. Os arquivos de entrada utilizados para este cálculo foram as imagens dos tempos inicial (2018) e final (2022), uma vez que a função usa o tempo como parâmetro (Oliveira et al., 2020).

Durante o processo de ajuste do modelo, as distâncias em hectares foram determinadas para as variáveis estáticas contínuas, e, para cada uma dessas distâncias, os pesos de evidência foram calculados em relação ao objeto de referência nos mapas de variáveis. A variável dinâmica e as variáveis estáticas contínuas exigem parâmetros de classificação, que incluem o incremento mínimo (correspondente à resolução das células nos mapas de distância, que é de 120 metros), os deltas máximos e mínimos, e os ângulos de tolerância, que indicam o desvio angular em relação a uma linha reta (Piontekowski et al., 2019).

Para estimar as variáveis estáticas contínuas (declividade e altitude), elas foram reclassificadas

em intervalos ou hectares de interesse. No caso da declividade (medida em graus), foi escolhido um incremento de 1 grau para cada intervalo. Para a altitude (em metros), o incremento estipulado foi de 10 m. Quanto às variáveis estáticas categóricas, estas foram classificadas como categorias específicas, e o cálculo do peso de evidência foi realizado para cada tipo específico de categoria no mapa.

Na etapa de simulação do modelo, os seguintes dados de entrada foram fornecidos ao DINAMICA EGO: i) a matriz de transição "*Multiple Step*"; ii) os pesos de evidência calculados; iii) o mapa inicial de uso e cobertura do solo; iv) os mapas das variáveis estáticas; e v) o mapa das microbacias. O modelo utiliza duas funções na plataforma DINAMICA EGO para o processo de transição de células entre diferentes estados: "*expander*" e "*patcher*". A função *expander* é responsável por expandir o desmatamento a partir de áreas já desmatadas, enquanto a função *patcher* cria novas áreas de desmatamento ao encontrar células próximas ao mesmo local, permitindo que uma transição conjunta ocorra.

É necessário definir a porcentagem de células que sofrerão mudanças em cada período do cenário pela função "*expander*" através da função "*modulate change matrix*", deixando o programa distribuir automaticamente o restante para a função "*patcher*". Neste estudo, definiu-se que 70% das mudanças seriam realizadas pela função "*expander*", uma porcentagem obtida após vários testes, até que se alcançasse um resultado que apresentasse uma melhor simulação espacial do desmatamento na área de estudo. Com isso, a porcentagem de mudanças realizadas pela função "*patcher*" foi de 30%.

Além disso, foi necessário configurar no modelo os parâmetros de média, variância e isometria para as funções "*expander*" e "*patcher*". Para a função "*expander*", a média de desmatamento foi de 5,43 hectares e a média de regeneração natural, de 3,50 hectares; a variância do desmatamento foi de 20 hectares e a de regeneração natural, de 12,5 hectares; a isometria foi de 1,5 tanto para desmatamento quanto para regeneração natural. Para a função "*patcher*", os parâmetros de média, variância e isometria foram os mesmos da função "*expander*", tanto para desmatamento quanto para regeneração. Esses valores foram estabelecidos após testes e validações sucessivas.

Após definição dos parâmetros mencionados, o modelo de simulação foi executado, resultando em mapas simulados para os anos de 2018 a 2022. Paralelamente, foi gerado um mapa de probabilidade, que indicou as áreas mais suscetíveis ao desmatamento com base nos pesos de evidência dos mapas de variáveis.

Na etapa de validação do modelo, foi necessário verificar a similaridade entre as mudanças reais e o mapa simulado em comparação a um mapa de referência. Neste caso, o mapa de uso e cobertura do solo para o ano de 2022 foi usado como referência, juntamente com o mapa de desmatamento do

mesmo ano, obtido a partir dos dados do MapBiomias.

Para a validação, a plataforma DINAMICA EGO utiliza o método de similaridade *Fuzzy*, aplicando pixels ímpares de 1 x 1 até 13 x 13 pixels. Através do método de similaridade *Fuzzy*, são produzidos mapas de diferença, derivados dos mapas de paisagem inicial e final, bem como do mapa simulado. O método de decaimento, baseado na similaridade da vizinhança local do pixel analisado, aplica diferentes tamanhos de janelas aos mapas de diferença, calculando o valor *Fuzzy* para cada célula central da janela e ajustando-o constantemente para 1 à medida que as células de mudança são identificadas, independentemente de sua posição.

2.7 Cenários futuros

As projeções de cenários futuros foram realizadas para os seguintes cenários:

- **Cenário Tendencial:** neste cenário, foram mantidos os mesmos padrões de desmatamento observados até o último ano da análise, sendo considerado “business as usual”. Utilizou-se a média anual de desmatamento ocorrida nos anos de 2018 a 2022, e esses mesmos anos foram considerados para a calibração dos pesos de evidência.
- **Cenário Otimista:** neste cenário, foram consideradas as seguintes condições: não ocorrência de desmatamento em áreas protegidas; e em APPs. A média anual de desmatamento dos anos de 2018 a 2022 também foi utilizada para este cenário.
- **Cenário Pessimista:** neste cenário, foram consideradas as condições: ocorrência de desmatamento em áreas protegidas; e em APPs. Utilizou-se a média anual de desmatamento ocorrida nos anos de 2021 e 2022, uma vez que esses foram os anos do período de análise com as maiores taxas de desmatamento observadas.

Para a modelagem do cenário tendencial e do pessimista, foi utilizado o período de 2018 a 2022 visando manter a coerência com as tendências recentes de desmatamento, permitindo uma representação mais realista e ajustada dos padrões de uso da terra. A escolha desse intervalo de cinco anos alinha-se à prática recomendada para calibrar o modelo DINAMICA EGO, que demanda dados representativos das condições atuais e padrões de mudança, mas sem incluir intervalos muito extensos, que poderiam comprometer a sua precisão (Rodrigues and Soares-Filho, 2018).

Estudos de modelagem espacial, especialmente em dinâmicas de uso e cobertura do solo, destacam que séries temporais longas podem introduzir ruídos nos dados, decorrentes de políticas, mudanças econômicas e alterações ambientais que não são mais representativas no presente contexto

(Rodrigues and Soares-Filho, 2018). A utilização de intervalos curtos para a calibração do modelo permite captar de forma mais acurada os pesos de evidência de variáveis de pressão, como a proximidade de estradas e áreas urbanas, que são dinâmicas e respondem rapidamente às mudanças de ocupação do solo e políticas de conservação (Ferreira et al., 2019).

Assim, ao utilizar a média anual de desmatamento entre 2018 e 2022, o cenário tende a captar com maior fidelidade os padrões espaciais e as intensidades de pressão atuais, reduzindo o impacto de eventuais flutuações ou políticas passadas que poderiam não refletir o cenário atual. Dessa forma, a escolha desse período específico atende à necessidade de calibrar o modelo com dados recentes e compatíveis com a realidade do contexto regional, conferindo maior robustez e confiabilidade ao cenário de simulação.

Para todos os cenários, o desmatamento na Bacia do Rio Descoberto foi projetado até o ano de 2052. Em cada cenário, foi analisada a fragmentação florestal em diferentes classes de tamanho, considerando as seguintes faixas em hectares: ≤ 10 , 10-50, 50-200, 200-1000, e > 1000 ha.

2.8 Análise estatística dos dados

Com o objetivo de analisar a relação entre o desmatamento ao longo dos anos da série histórica observada e as vazões dos rios, bem como os dados climáticos, foram coletados dados de vazão, precipitação e evapotranspiração. Além disso, foram obtidos dados sobre as outorgas de captação de água fornecidas pela ANA, entre 2010 e 2022, que incluíram outorgas para fins de irrigação, abastecimento público e consumo humano.

Para todas as variáveis, foi aplicado o teste de Cox-Stuart para verificar a tendência dos dados. O teste de Cox-Stuart é um teste estatístico usado para identificar tendências monótonas (crescentes ou decrescentes) em séries temporais, avaliando se há uma direção consistente na variação dos dados ao longo do tempo. Ele compara pares sucessivos de valores para verificar se há uma mudança significativa na tendência, sendo útil em contextos como monitoramento ambiental e industrial, onde se busca simplicidade e eficácia sem suposições complexas (Militino et al., 2020; Nentwich and Reinhart, 2021).

Para a análise de correlação dos dados, a premissa de normalidade foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk. O teste de Shapiro-Wilk é uma técnica para verificar a normalidade de um conjunto de dados. Ele calcula a estatística W , que mede a correlação entre a amostra observada e uma distribuição normal teórica. Valores de W próximos a 1 indicam que os dados provavelmente seguem

uma distribuição normal, enquanto valores menores sugerem uma rejeição da normalidade (Ag-Yi and Aidoo, 2022).

Em seguida, foi utilizado o coeficiente de correlação de Spearman (ρ) para a avaliação das variáveis que não apresentaram distribuição normal. O coeficiente de correlação de Spearman mede a associação entre duas variáveis por meio de uma relação monotônica, útil quando os dados não atendem à normalidade ou são ordinais. Ao calcular a correlação baseada nas classificações das variáveis, Spearman verifica se uma variável tende a aumentar ou diminuir conforme a outra varia. O coeficiente varia de -1 a 1, indicando correlações negativas e positivas perfeitas, respectivamente, enquanto valores próximos de zero apontam para ausência de associação (Mabit et al., 2022). A equação abaixo representa o coeficiente de correlação:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d^2}{n(n^2 - 1)}$$

Em que: $d = R(x_i) - R(y_i)$, ou seja, a diferença entre os postos das variáveis no nível i .

O nível de significância (p) utilizado para todos os testes foi igual a 5%, ou seja, para que a correlação fosse considerada significativa, o valor de p precisava ser inferior a 0,05. Os dados foram analisados com o auxílio do software Action Stat no Microsoft Excel.

3. RESULTADOS

3.1 Classificação do uso e cobertura do solo

Após obtenção e análise do uso e cobertura do solo da série histórica da Coleção 8.0 do MapBiomias, constatou-se que a formação savânica é o tipo de cobertura predominante tanto no ano inicial (2010) quanto no final (2022), seguida pela pastagem (Tabela 1). Observou-se um aumento substancial das áreas urbanizadas, pastagem e formação campestre ao longo dos 12 anos analisados. Outros usos da terra, como silvicultura, campo alagado, lavouras temporárias, soja, áreas não vegetadas e corpos d'água, também foram identificados na região, embora em proporções menores (Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Tabela 1: Classes de uso e cobertura do solo em 2010 e 2022 na área de estudo.

Uso e Cobertura da Terra	Área (ha)		%	
	2010	2022	2010	2022
Formação savânica	343.731,62	321.751,11	27,6	28,32
Pastagem	193.849,05	268.278,83	15,56	23,62

Área urbanizada	121.279,17	161.992,82	9,74	14,26
Formação campestre	62.618,50	136.445,18	5,03	12,01
Formação florestal	91.037,69	91.770,08	7,31	8,08
Agricultura e Pastagem	222.201,40	42.109,78	17,84	3,7
Corpos de água	42.281,20	38.708,01	3,39	3,41
Áreas não vegetadas	59.850,19	36.909,22	4,80	3,25
Soja	12.808,89	13.003,00	1,02	1,14
Campo alagado	88.462,37	12.841,76	7,10	1,13
Lavouras temporárias	6.647,24	7.277,48	0,53	0,64
Silvicultura	874,86	4.803,66	0,07	0,42
Total	1.247.652,18	1.137.912,93	100	100

Fonte: Autor.

Além disso, a partir da classificação do uso e cobertura do solo obtida, foi realizada uma reclassificação dos dados em apenas três classes: áreas vegetadas, áreas não-vegetadas e corpos hídricos (Tabela 2). Foi possível observar uma diminuição das áreas vegetadas à medida que as áreas não-vegetadas avançaram. No ano de 2022, mais da metade da bacia (63,59%) era composta por áreas não-vegetadas (Tabela 2).

Tabela 2: Reclassificação do uso e cobertura do solo em áreas vegetadas e não-vegetadas nos anos de 2010 e 2022 na área de estudo.

Uso e Cobertura da Terra	Área (ha)		%	
	2010	2022	2010	2022
Áreas vegetadas	46.856,00	45.691,00	35,17	34,30
Áreas não-vegetadas	83.240,00	84.706,00	62,49	63,59
Corpos hídricos	3.117,00	2.807,00	2,34	2,11

Fonte: Autor.

3.2 Parâmetros de entrada do modelo

Através de testes algébricos realizados no DINAMICA EGO, foram geradas matrizes de transição globais (*Single Step*) e anuais (*Multi Step*) correspondentes à série histórica de desmatamento de 2018 a 2022. Essas estimativas de desmatamento referem-se à bacia como um todo. Como o modelo exige a regionalização do território por microbacias, foram calculados valores específicos para as matrizes de transição globais e anuais para cada microbacia.

Para o período de 2018 a 2022, obteve-se um valor de 0,086504, indicando que 8,650% da Bacia do Rio Descoberto foi desmatada ao longo de cinco anos. Além disso, o valor de 0,022653 indica que aproximadamente 2,265% da bacia foi desmatado anualmente (Tabela 3).

Tabela 3: Matriz de transição global e anual de desmatamento no período de 2018 a 2022.

Matriz de transição global			Matriz de transição anual		
De/Para	Desmatamento	Floresta	De/Para	Desmatamento	Floresta
Floresta	8,650%	–	Floresta	2,265%	–
Desmatamento	–	3,013%	Desmatamento	–	0,081%

Fonte: Autor.

3.3 Simulação e validação

Na etapa de simulação e validação do modelo, foi utilizada a série histórica de desmatamento de 2018 a 2022. Para esse propósito, foram produzidos um mapa de probabilidade e um mapa simulado de transição de cobertura do solo para o ano de 2022 (Figura 4). É possível observar que as áreas com maior probabilidade de ocorrer desmatamento estão concentradas nas regiões com maiores aglomerados urbanos.

O desmatamento projetado para o ano de 2022 foi modelado com base nas taxas de desmatamento observadas entre 2018 e 2022. Assim, os dados de desmatamento desses cinco anos foram utilizados como referência para a validação da simulação de desmatamento para 2022. Utilizando o índice de similaridade Fuzzy, foi realizada uma análise quantitativa das discrepâncias entre os mapas observados e simulados, permitindo avaliar a eficácia do modelo com as múltiplas variáveis selecionadas para representar o desmatamento na área de estudo (Tabela 4).

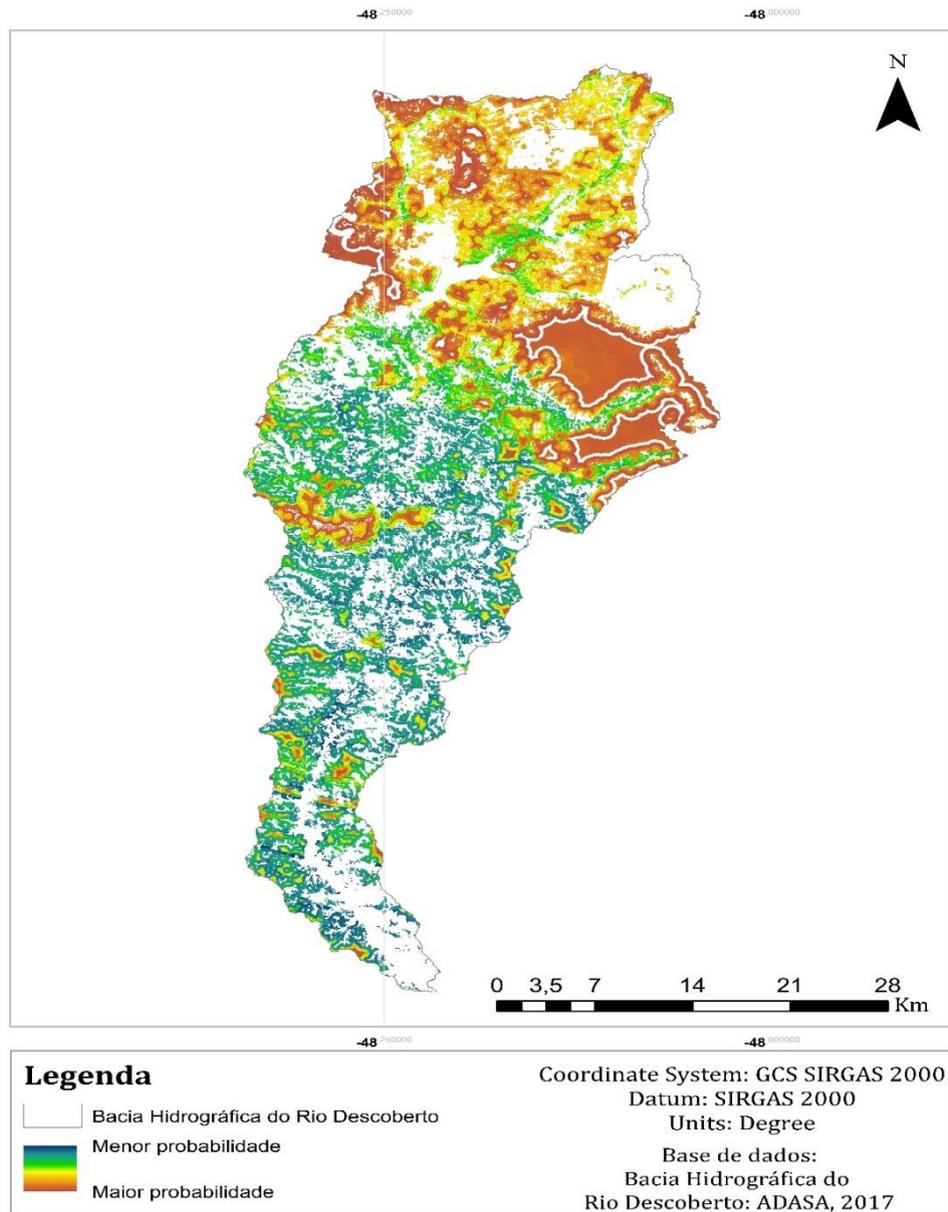


Figura 4: Probabilidade de desmatamento (transição de áreas de vegetação para áreas desmatadas na Bacia do Rio Descoberto com base na série histórica de 2018 a 2022).

Fonte: Autor.

Os resultados indicaram que, na avaliação célula a célula, 19% das células foram idênticas entre o mapa simulado e o mapa de referência. Além disso, foi obtido um índice de aproximadamente 51% de similaridade entre os mapas. Esta comparação foi realizada utilizando uma janela de 7x7 células (Tabela 4).

Tabela 4: Validação do índice de similaridade *Fuzzy* nos diferentes tamanhos de janela.

Modelo	Tamanho das janelas (pixels)	Índice de similaridade <i>Fuzzy</i>
Simulação dos anos de 2018 a 2022	1x1	0,19
	3x3	0,29
	5x5	0,40
	7x7	0,51
	9x9	0,61
	11x11	0,69
	13x13	0,76

Fonte: Autor.

O índice de similaridade Fuzzy, utilizando uma função de decaimento constante, tende a aumentar conforme a resolução (tamanho da janela) adotada na análise aumenta (Figura 5). No entanto, os valores do índice de similaridade tendem a saturar ao atingir determinadas resoluções. Esse comportamento indica que, para janelas com resoluções muito baixas (grandes), o índice de similaridade se torna ineficaz para avaliar a concordância entre o mapa de referência e o mapa simulado (Rodrigues e Soares-Filho, 2018).

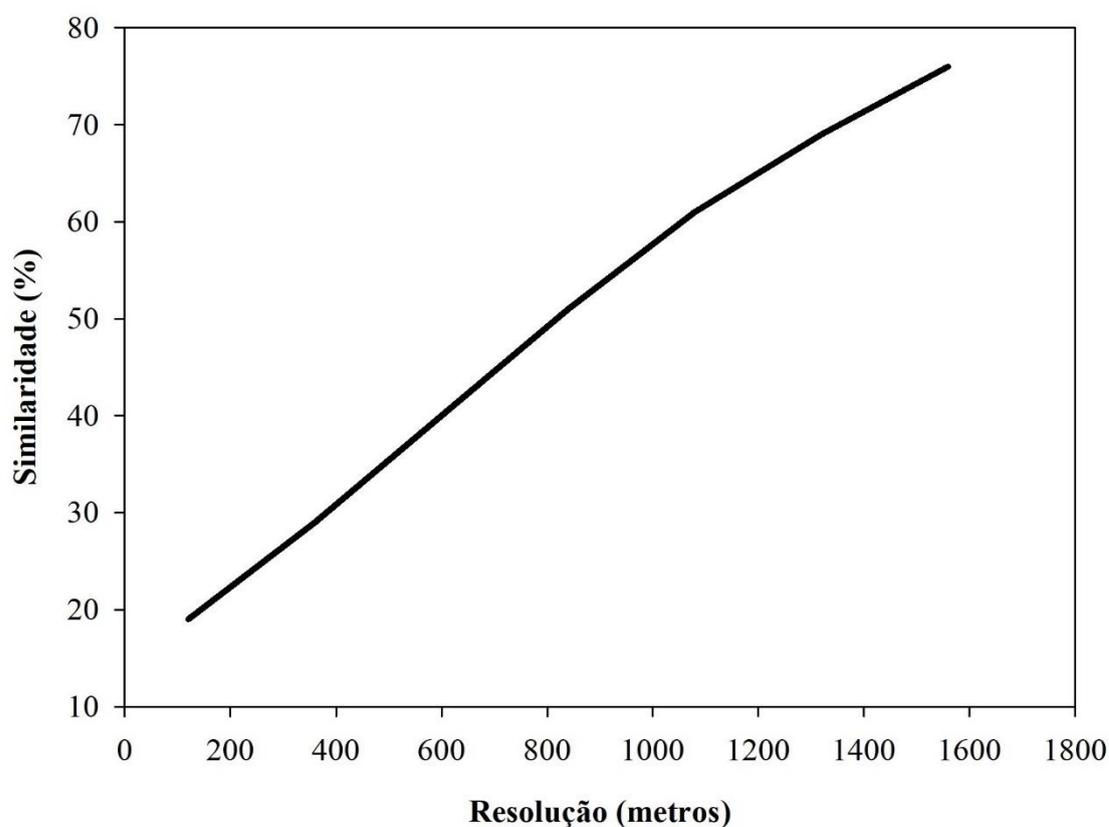


Figura 5: Variação do índice de similaridade Fuzzy em relação a diferentes resoluções.

Fonte: Autor.

3.4 Cenários futuros projetados

Foram obtidos três cenários futuros do desmatamento na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto até o 2052: cenário tendencial, cenário otimista e cenário pessimista (

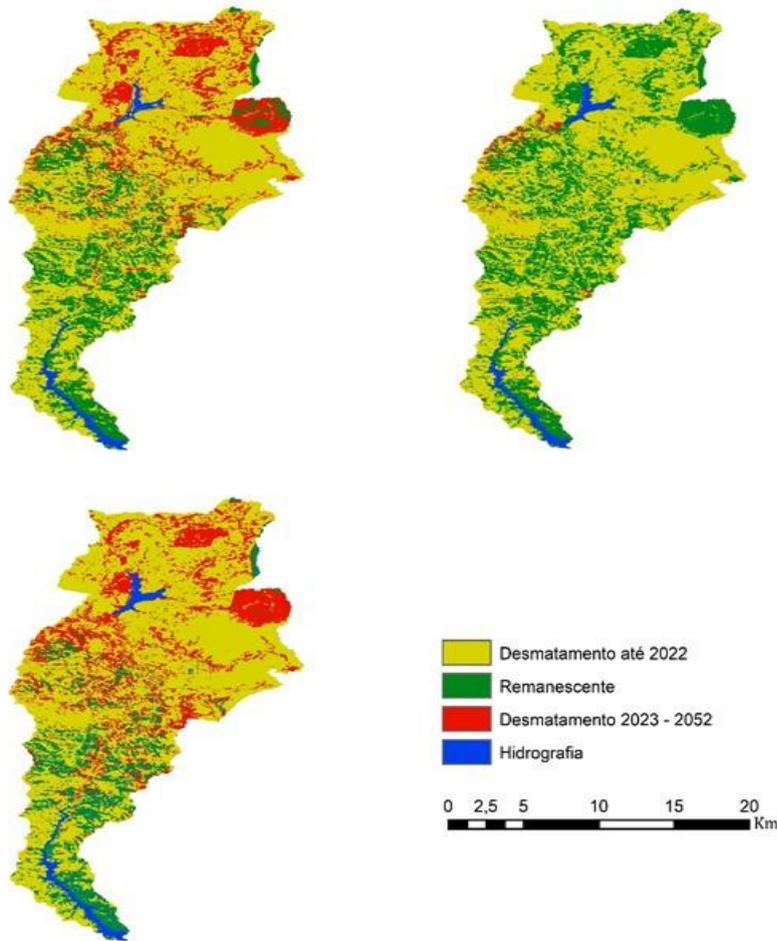


Figura 6).

No cenário tendencial, os resultados mostraram que o percentual de áreas desmatadas na Bacia do Rio Descoberto passaria de 63,59% (percentual de desmatamento observado até 2022) para aproximadamente 71,28% no ano de 2052. No cenário otimista, as projeções apresentaram que o percentual de áreas desmatadas na bacia passaria de 63,59% para aproximadamente 65,37%, um acréscimo de apenas 1,78% de áreas desmatadas. Já no cenário pessimista, os resultados apresentaram que o percentual de áreas desmatadas atingiria 87,16% até 2052, com um aumento de 23,57% em relação a 2022.

As quantidades de áreas desmatadas em cada cenário projetado até o ano de 2052 na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto estão apresentadas na

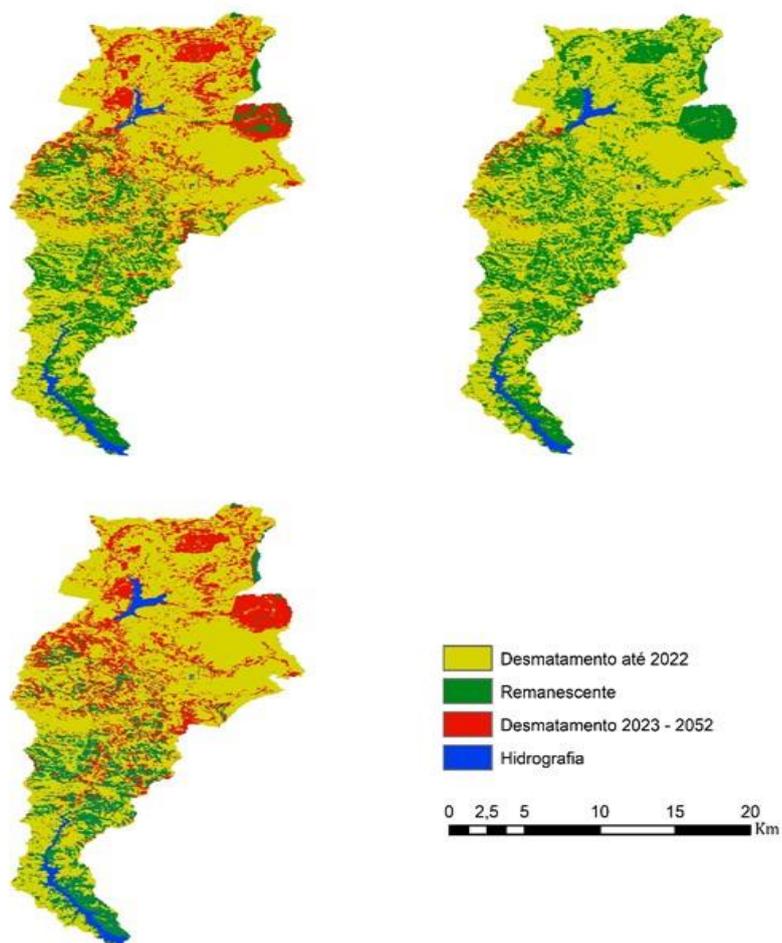


Figura 6. É possível observar, visualmente, a similaridade entre o mapa do cenário tendencial e o pessimista. Contudo, as taxas de acréscimo diferem significativamente: no cenário pessimista, o aumento é de 23,57%, enquanto no cenário tendencial o acréscimo é de 7,69% e no cenário otimista é de apenas 1,78%.

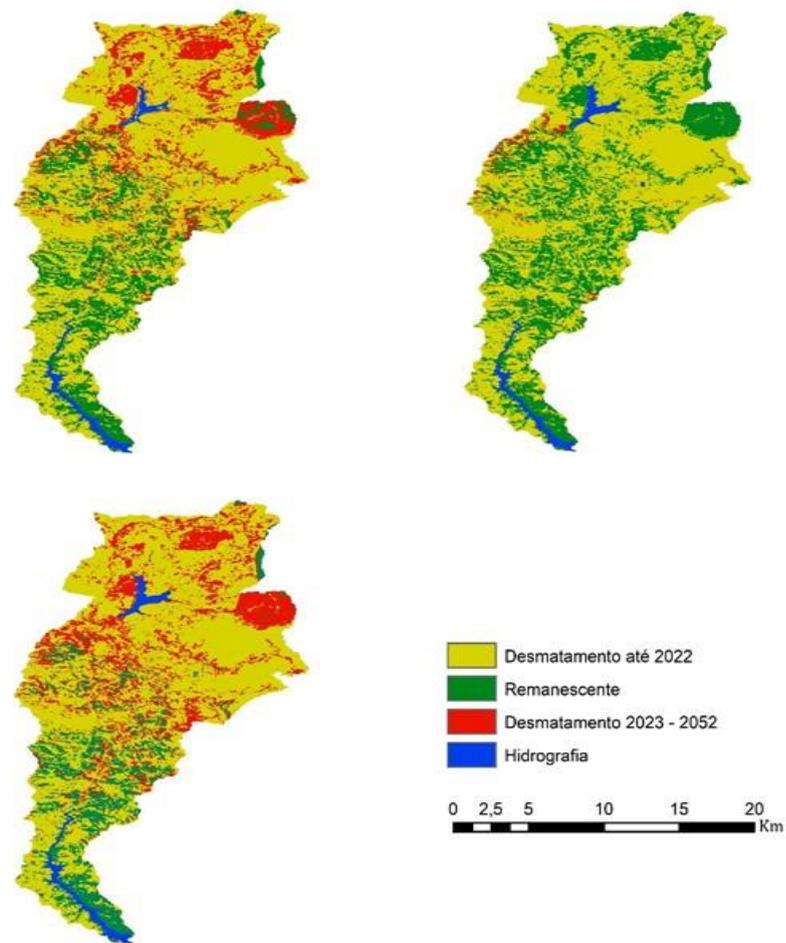


Figura 6: (a) Cenário tendencial (b) Cenário otimista; (c) Cenário pessimista.

Fonte: Autor.

O quantitativo de áreas desmatadas em hectares ao longo dos 30 anos projetados para os três cenários está apresentado na Figura 7. No cenário pessimista, as áreas desmatadas acumuladas foram superiores a 30.000 ha. Em contraste, no cenário tendencial, o desmatamento acumulado ultrapassou 20.000 ha, enquanto no cenário otimista as áreas desmatadas não excederam 5.000 ha (Figura 7).

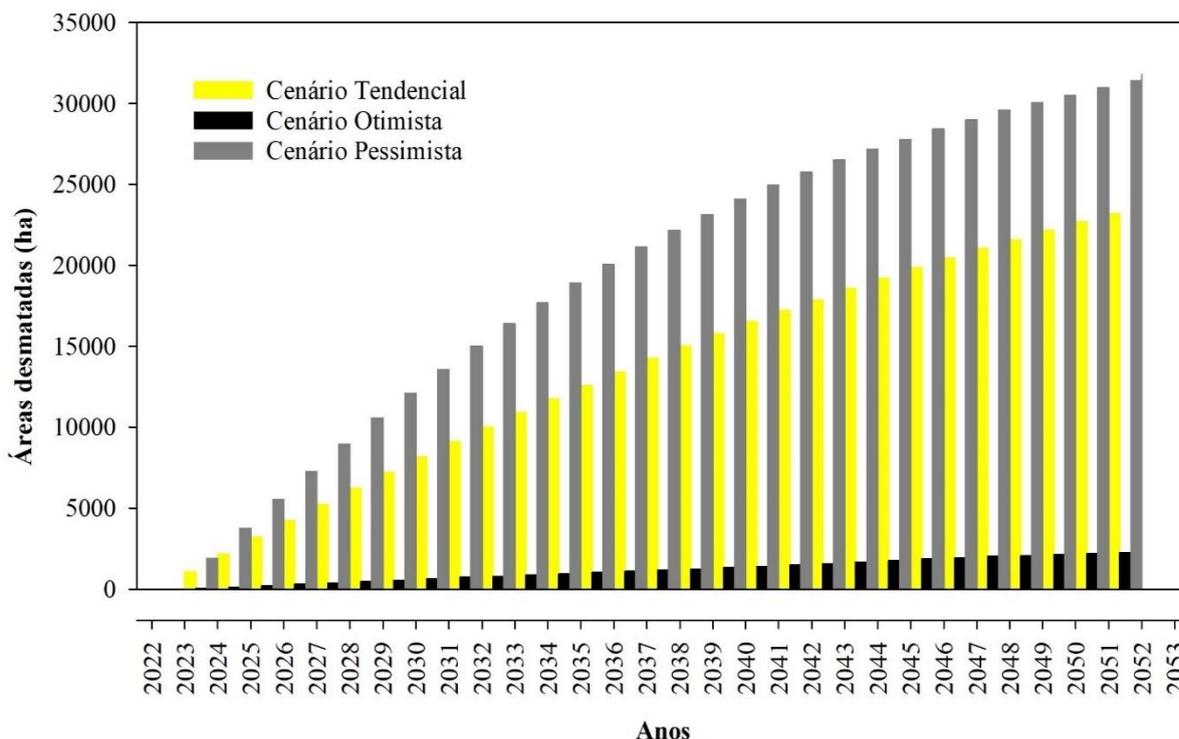


Figura 7: Quantitativo de áreas desmatadas em cada cenário projetado em hectares.

Fonte: Autor.

3.5 Fragmentação da vegetação

Na área da Bacia do Rio Descoberto, até o ano de 2022, já foi possível observar um alto nível de fragmentação da vegetação natural. Os polígonos de florestas com áreas de até 10 hectares representavam 89,52% dos fragmentos de vegetação, enquanto apenas 0,63% dos polígonos tinham áreas acima de 200 hectares e apenas 0,28% eram maiores que 1.000 hectares.

A simulação do cenário tendencial revelou um aumento na fragmentação da vegetação. Até o ano de 2052, as áreas de polígonos de vegetação com até 10 hectares representariam 97,02% da fragmentação, totalizando 4.298 hectares. As classes com até 200 hectares representam 0,45% da fragmentação, e as classes acima de 1.000 hectares, apenas 0,09%.

A simulação do cenário otimista para o ano de 2052 revelou um baixo incremento nas áreas de fragmentos de vegetação de até 10 hectares, representando 93,56%, o que corresponde a um aumento de 4,04% em relação ao cenário atual. As áreas de até 200 hectares representam 4,85% da fragmentação, e os polígonos acima de 1.000 hectares formam 0,17% da fragmentação. Em contraste, as simulações do cenário pessimista indicam que, para o ano de 2052, os polígonos de até 10 hectares

representariam

97,66%

da

fragmentação

(

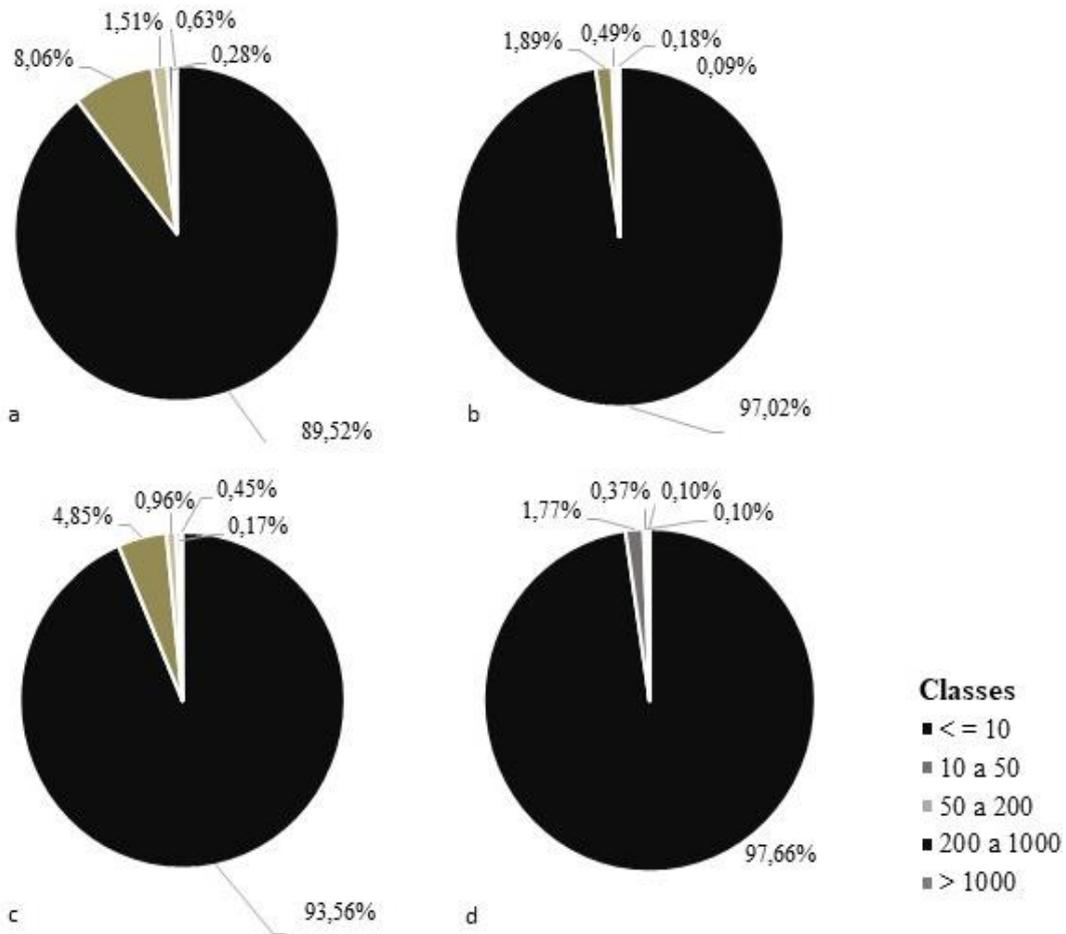


Figura 8).

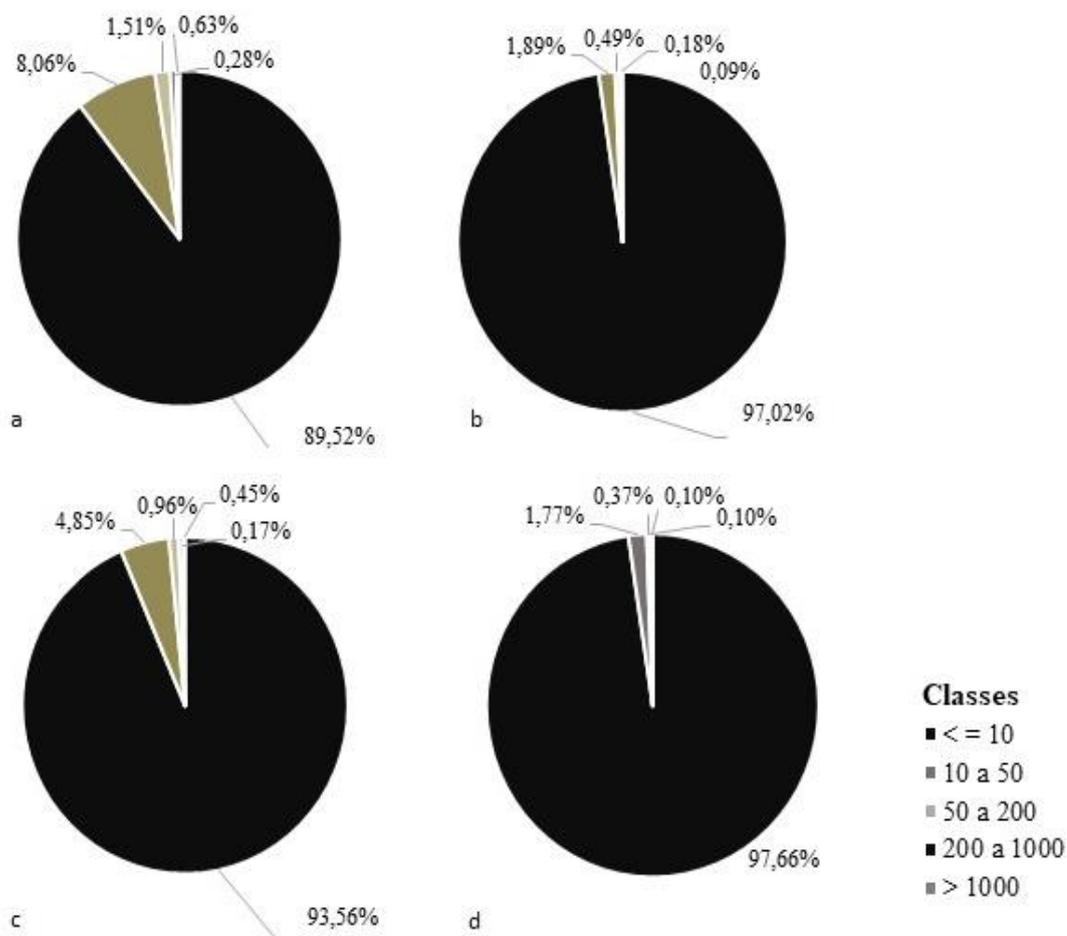


Figura 8: a) Fragmentação da vegetação em diferentes classes (ha) até 2022. b) Cenário tendencial; c) Cenário otimista; d) Cenário pessimista.

Fonte: Autor.

3.6 Correlação entre o desmatamento e as variáveis climáticas

Dentre as variáveis observadas, a que apresentou maior correlação negativa significativa com o desmatamento foi a vazão ($\rho \cong -0,78$), valor que indica correlação forte. Isso significa que, quanto maior o desmatamento, menor é a vazão dos rios, e vice-versa. Além disso, foram observadas correlações positivas moderadas entre vazão e precipitação ($\rho \cong 0,55$); e entre vazão e evapotranspiração ($\rho \cong 0,63$), sugerindo que essas variáveis tendem a aumentar ou a diminuir umas com as outras de forma direta. Entre desmatamento e precipitação, foi observada uma correlação negativa baixa ($\rho \cong -0,26$); e entre o desmatamento e evapotranspiração a correlação foi negativa moderada ($\rho \cong 0,50$). As correlações entre outorgas e as demais variáveis analisadas foram, em geral, negativas e baixas, todos a nível de significância de 5% (Tabela 5).

Tabela 5: Análise estatística dos dados - Correlação de Spearman.

Variáveis	Desmatamento (ha)	Vazões (m ³ /h)	Precipitação (mm)	Evapotranspiração (mm)	Outorgas (m ³ /h)
Desmatamento (ha)	1	-0,7785*	-0,2585	-0,4979	-0,0980
Vazões (m ³ /h)	-0,7785*	1	0,5549*	0,6263*	-0,1595
Precipitação	-0,2585	0,5549*	1	0,3736	-0,2014
Evapotranspiração (mm)	-0,4979	0,6263*	0,3736	1	-0,0028
Outorgas (m ³ /h)	-0,0980	-0,1594	-0,2014	-0,0028	1

4. DISCUSSÃO

4.1 Classificação do uso e cobertura do solo

O aumento de áreas de pastagem e a expansão de áreas urbanizadas de 2010 a 2022 na área da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto impulsionou a conversão de áreas vegetadas para não-vegetadas, uma vez que houve o aumento populacional e a consequente demanda por alimentos, fibras e energia (Ghosh et al., 2024; Lima et al., 2019). Dentre o aumento de classes de uso do solo observado de 2010 a 2022, o de pastagem foi o maior, o que era de se esperar visto que o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de carne do mundo, detendo o maior rebanho comercial do mundo e liderando as exportações de carne bovina (ABIEC, 2023) Aliado a isso, a dinâmica quanto às áreas de pastagens no Brasil é marcada por períodos de expansão e retração territorial, entre 2000 e 2021, as áreas naturais e antrópicas transformadas em pastagens totalizaram 47,1 milhões de hectares e Amazônia e Cerrado foram os principais alvos da conversão. Além da conversão ou abandono das pastagens nesse mesmo período mais que dobrou em relação ao registrado nas duas décadas anteriores: 44,7 milhões de hectares, principalmente nos biomas Cerrado e Mata Atlântica (MapBiomas, 2022).

O aumento da formação campestre na área pode estar ligado a diversos fatores ecológicos, legais e de manejo ambiental que têm promovido a expansão desse tipo de vegetação. No Cerrado e em outros biomas brasileiros, a expansão das áreas campestres está frequentemente associada a um aumento na incidência de queimadas, tanto naturais quanto induzidas por atividades humanas, que impulsionam a regeneração de gramíneas e outras plantas características desse tipo de formação. Essas áreas de vegetação herbácea e de baixa altura têm grande capacidade de recuperação após incêndios, ao contrário das florestas, que demoram mais para se restabelecer. Práticas de manejo da vegetação, como a introdução de gramíneas nativas em substituição às pastagens, têm sido promovidas para melhorar a produtividade do solo e preservar a biodiversidade. A legislação ambiental brasileira, ao permitir queimadas controladas em áreas campestres, facilita o manejo integrado do fogo. Esse método

contribui para a conservação da biodiversidade e reduz o acúmulo de biomassa, prevenindo incêndios de grande magnitude (Silva Arruda et al., 2024; Pompeu et al., 2024).

4.2 Cenários futuros projetados

Para subsidiar tomadas de decisões voltadas para a sustentabilidade ambiental, são necessárias informações consistentes que envolvam avanços técnicos e científicos, ações institucionais e políticas governamentais conforme disposto por Hemati et al. (2020). Para isso, o uso de modelos é uma das estratégias para alcançar resultados que apoiem as ações necessárias (Reis, 2023)

Os resultados do DINAMICA EGO neste estudo apresentaram, principalmente, através dos cenários tendencial e pessimista, que a presença de áreas protegidas na área da Bacia hidrográfica do Rio Descoberto, podem contribuir parcialmente para conter o avanço do desmatamento na área de estudo. As formas de ocupação diferenciadas das UCs possibilitam maior capacidade de conservação do território, com o alinhamento dos diferentes tipos de uso da terra (Anderson et al., 2018). A existência dos instrumentos de planejamento e gestão, além da contribuição da comunidade no conselho gestor e na mediação de conflitos, podem otimizar ações de manejo. Dessa forma, as áreas protegidas são importantes para conter o desmatamento e a expansão urbana (Santos et al., 2022)

O modelo DINAMICA EGO, por ser flexível, permitiu a personalização dos dados e variáveis, diferentemente de outros modelos. A abordagem utilizada de probabilidade de transição para modelar as mudanças no uso do solo, considerou fatores de condução específicos, conforme os utilizados neste estudo, tais como as áreas protegidas. A precisão da simulação depende da qualidade e relevância desses fatores (Cheng et al., 2020). Neste estudo, foram utilizadas variáveis geofísicas, de proximidade e biodiversidade, ainda, não foi possível considerar outros fatores, como por exemplo a política de infraestrutura devido à ausência desses dados. Com isso, podem ocorrer variações devido à ausência de alguns fatores (Hemati et al., 2020).

Embora as simulações de desmatamento não consigam prever com precisão as ações futuras, elas são fundamentais para identificar as áreas mais vulneráveis ao desmatamento, como é o caso de áreas próximas à centros urbanos, e áreas não-protegidas, conforme evidenciado através dos resultados. Além disso, essas simulações podem apontar os potenciais impactos sobre o meio ambiente, como a fragmentação da vegetação, e auxiliar no processo de encontrar alternativas para mitigar ou evitar o desmatamento e seus impactos (Piontekowski et al., 2019).

4.3 Fragmentação da vegetação

O desmatamento projetado para os cenários, apresentou no cenário otimista cerca de 97,02% das classes de vegetação com 10 ha ou menos, para o cenário otimista, essa classe foi reduzida para 93,56%, e no cenário pessimista, aumentou 97,66%, indicando que nos cenários onde o desmatamento é maior, a fragmentação da vegetação também é maior. Conforme apontado por Cerqueira et al. (2021), a fragmentação florestal é uma das principais consequências da antropização em áreas com vegetação nativa, caracterizada pela ruptura da unidade vegetacional, resultando em pequenos fragmentos isolados onde antes havia uma área contínua de floresta.

Outro fator importante atribuído ao aumento da fragmentação da vegetação na Bacia do Descoberto pode estar atrelado a duplicação da BR 070 entre 2007 a 2011 que impulsionou o aumento populacional de 80 mil para quase 200 mil habitantes entre os anos de 2010 e 2022. As mudanças no uso do solo intraurbano em uma cidade de médio porte mostraram que novos loteamentos residenciais e industriais tendem a aparecer ao redor de áreas onde esses tipos de loteamentos já existem e em áreas com boa acessibilidade e/ou que estão próximos das principais vias (Almeida et al., 2008), assim, o tamanho dos fragmentos urbanos simulados aumenta em áreas com maior desmatamento e proximidade às estradas (Santos et al., 2022).

A conversão da vegetação nativa em pastagem cultivada para outros usos no período analisado, resultou na fragmentação do bioma na Bacia do Rio Descoberto, como demonstrado na área de vegetação nativa avaliada, com a fragmentação da vegetação natural em favor da expansão urbana, da pecuária e da agricultura, por exemplo, uma prática comum no Cerrado, um *hotspot* ecológico no Brasil (Alencar et al., 2020; Oliveira et al., 2024; Ozório et al., 2019). Tal comportamento pode ser observado a partir da análise do uso do solo da série histórica, e foi potencializado na geração dos cenários futuros.

Os efeitos do desmatamento do Cerrado para conversão de vegetação nativa em áreas de pastagem e em outros usos, podem resultar em impactos negativos na capacidade de capturar e armazenamento de carbono e nitrogênio na vegetação nativa (Oliveira et al., 2024). Além disso, foram observados impactos negativos em variáveis hidrológicas e climáticas, como é o caso das vazões dos rios. Em linha com essa perspectiva, uma alternativa para conter o desmatamento e seus impactos, seria propor negociações com os proprietários de terras que exercem uma influência substancial na perda de vegetação no Cerrado. Por exemplo, ao incentivar todas as propriedades (particularmente aquelas em regiões que exigem de 20% a 35% de Reservas Legais) com mais de 2.500 hectares a designar 30% de suas áreas como zonas protegidas ou sob manejo sustentável; complementando a Reserva Legal; ganhos significativos de conservação poderiam ser alcançados (Colman et al., 2024).

4.4 Impactos do desmatamento em variáveis hidrológicas e climáticas

O desmatamento observado na bacia ao longo da série histórica analisada, causou impactos negativos na vazão dos corpos hídricos, apresentando uma relação inversamente proporcional, ou seja, conforme o desmatamento aumentou, a vazão diminuiu. A remoção da vegetação, a expansão urbana e a poluição trazem consequências, tais como: processos erosivos, assoreamento, e redução das vazões dos rios (Figueredo et al., 2019; Peruchi Trevisan et al., 2020). Também foi possível observar que há uma correlação positiva entre a vazão e precipitação, ou seja, à medida que a vazão diminui, a tendência da precipitação também é diminuir (Bati et al., 2023), interferindo no regime de chuvas local. Souza et al., 2022 apresenta correlação entre índices de precipitação e vazões em diferentes regiões de precipitação. Ainda, Kuki et al. (2020), citam as influências do processo de previsão de vazões integradas às previsões de precipitação.

A tendência à redução da vazão e precipitação na bacia, podendo ocasionar episódios de seca, que interferem no armazenamento do Reservatório do Descoberto, a principal fonte de abastecimento hídrico do Distrito Federal. Episódios de seca anteriores já impactaram o nível do reservatório, o que gerou necessidade de racionamento de água para a população no ano de 2017 (Batista e Moura, 2019). A baixa correlação das outorgas com as demais variáveis sugere que as políticas de outorgas de água podem não estar diretamente alinhadas com as condições ambientais ou podem ser influenciadas por outros fatores, como demanda econômica ou pressões sociais, que não estão diretamente relacionadas aos parâmetros ambientais estudados.

Embora tenha sido observada correlação positiva entre a vazão e evapotranspiração, uma variável não causou efeito sobre a outra, uma vez que, a vazão apresentou tendência a diminuição, enquanto a evapotranspiração não apresentou variação significativa. Esse padrão observado pode ser o reflexo da complexidade do ciclo hidrológico (Onuchin et al., 2021). Em áreas com vegetação saudável, a evapotranspiração pode ser alta, mas ao mesmo tempo, a vegetação pode contribuir para a manutenção das vazões dos rios através da recarga dos aquíferos e moderação do escoamento superficial (Calder, 1998; Rungee et al., 2021).

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a área possui tendência a crescente urbanização, e, ao mesmo tempo, as áreas com vegetação natural cederam espaço para áreas cultivadas. Estudos como o de Amini Parsa e Salehi (2016), mostram que, à medida que a urbanização e as áreas construídas aumentam, a tendência é que as áreas cultivadas também aumentem, como por exemplo agricultura e silvicultura, devido à demanda crescente por recursos naturais. A área da bacia atualmente não possui tendência de mudanças no uso do solo conservacionistas. As atividades precisam ser

direcionadas na execução das leis e políticas de desenvolvimento aprovadas para a região com base em estudos e planejamento.

5. CONCLUSÕES

A análise da série histórica até 2022, juntamente com a projeção dos cenários futuros, revelou impactos significativos do desmatamento na fragmentação da vegetação local, resultando em classes de vegetação altamente fragmentadas. Além disso, foi observada, com base nos dados históricos até 2022, uma diminuição das vazões dos rios e da precipitação, evidenciando impactos negativos do desmatamento nos recursos hídricos da bacia. A forte correlação entre desmatamento e vazão dos rios sugere que, com o avanço contínuo da remoção da vegetação natural, o desmatamento continuará a impactar negativamente os recursos hídricos ao longo dos anos.

A expansão de áreas de pastagem e urbanas na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto entre 2010 e 2022 gerou impactos significativos nos aspectos hidrológicos. A conversão da vegetação nativa em áreas de pastagem e urbanização intensificou a fragmentação florestal, diminuindo a conectividade dos habitats e colocando em risco a biodiversidade, especialmente em um hotspot ecológico como o Cerrado. O desmatamento resultante dessa conversão contribuiu para a redução da capacidade de infiltração e armazenamento de água, afetando negativamente o regime hídrico, o que pode levar a secas e impactar o reservatório do Descoberto, principal fonte de abastecimento do Distrito Federal. Além disso, a menor cobertura vegetal afeta a qualidade da água devido ao aumento do escoamento superficial e processos erosivos, que também comprometem a capacidade de suporte e a resiliência dos ecossistemas locais.

Os resultados apresentados neste estudo podem subsidiar tomadores de decisão para melhor compreensão e definição de estratégias para redução do desmatamento e conservação dos recursos naturais no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia e conceitos aplicados para a modelagem dos cenários futuros de desmatamento no software DINAMICA EGO foram satisfatórios para representar o desmatamento sob as três perspectivas diferentes na bacia do rio Descoberto. As variáveis empregadas apresentaram suas influências tanto no sentido de restringir, como no de potencializar o desmatamento na área de estudo.

A partir dos resultados obtidos através dos cenários tendencial e pessimista, é possível observar que, caso não haja o gerenciamento adequado, o desmatamento irá aumentar até o ano de 2052 na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Isso resulta em níveis de degradação elevados, e em mudanças na paisagem que acarretam em consideráveis implicações ambientais, como é o caso da fragmentação da vegetação que comprometerá a biodiversidade na região. Além disso, foi possível observar a influência do desmatamento na vazão dos corpos hídricos, e, com o aumento do desmatamento até o ano de 2052, a tendência é que a vazão continue a diminuir até o mesmo ano.

Os resultados deste estudo indicam a necessidade de investigações futuras que explorem a integração de cenários de uso e cobertura da terra com projeções de mudanças climáticas, como precipitação, evapotranspiração e temperatura, para aprimorar a compreensão dos impactos no regime hidrológico e na qualidade ambiental da Bacia do Rio Descoberto. Estudos que comparem os cenários futuros de uso do solo com cenários climáticos específicos podem ajudar a identificar áreas com maior vulnerabilidade à escassez hídrica e mudanças climáticas, oferecendo uma perspectiva mais robusta para o planejamento de estratégias de mitigação. Além disso, seria relevante avaliar o impacto do desmatamento nas funções ecossistêmicas e na qualidade do solo, incluindo o potencial de sequestro de carbono e a perda de nutrientes. Essa abordagem integrada permitiria uma visão mais abrangente dos riscos ambientais e das necessidades de conservação, além de orientar ações de manejo que promovam a resiliência da bacia frente às pressões socioambientais projetadas para as próximas décadas.

REFERÊNCIAS

- Ag-Yi, D., Aidoo, E., 2022. A comparison of normality tests towards convoluted probability distributions. *Res. Math.* 9. <https://doi.org/10.1080/27684830.2022.2098568>
- Alencar, A., Z. Shimbo, J., Lenti, F., Balzani Marques, C., Zimbres, B., Rosa, M., Arruda, V., Castro, I., Fernandes Márcico Ribeiro, J.P., Varela, V., Alencar, I., Piontekowski, V., Ribeiro, V., M. C. Bustamante, M., Eyji Sano, E., Barroso, M., 2020. Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. *Remote Sens.* 12, 924. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>
- Almeida, C., Gleriani, J., Castejon, E., Filho, B., 2008. Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land-use dynamics. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 22, 943–963. <https://doi.org/10.1080/13658810701731168>
- Amini Parsa, V., Salehi, E., 2016. Spatio-temporal analysis and simulation pattern of land use/cover changes, case study: Naghadeh, Iran. *J. Urban Manag.* 5, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2016.11.001>
- Anandhi, A., Kannan, N., 2018. Vulnerability assessment of water resources – Translating a theoretical concept to an operational framework using systems thinking approach in a changing climate: Case study in Ogallala Aquifer. *J. Hydrol.* 557, 460–474. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.032>
- Anderson, Y., Masullo, G., Gurgel, H., Laques, A., Castro, S., 2018. Environmental control index of the protect areas of Maranhão 36, 104–116.
- Andrade, Á.D.S., Ribeiro, S.D.C.A., Pereira, B.W.D.F., Brandão, V.V.P., 2020. Fragmentação da vegetação da bacia hidrográfica do Rio Marapanim, nordeste do Pará. *Ciênc. Florest.* 30, 406. <https://doi.org/10.5902/1980509835074>
- Bati, H.G., Agumassie, T.A., Tegaye, T.A., Belete, M.D., 2023. Effects of landscape attributes and climate variables on catchment hydrology. *Environ. Syst. Res.* 12, 9. <https://doi.org/10.1186/s40068-023-00290-y>
- Batista, R.A., Moura, D.O., 2019. Análise crítica da narrativa da série de reportagens “Brasília na seca: um ano sem água.” *Rev. Comun.* 8, 105–129. <https://doi.org/10.58050/comunicando.v8i1.165>
- Beef Report 2023 | Perfil da Pecuária no Brasil - ABIEC, 2023. URL <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2023/> (accessed 9.18.24).
- Bolson, S.H., 2018. O CERRADO NAS METAS BRASILEIRAS DO ACORDO DE PARIS: A OMISSÃO DO ESTADO BRASILEIRO COM O DESMATAMENTO NA CUMEEIRA DA AMÉRICA DO SUL. *Rev. Direito Ambient. E Socioambientalismo* 4, 112. <https://doi.org/10.26668/IndexLawJournals/2525-9628/2018.v4i1.3996>
- Calder, I.R., 1998. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiol.* 18, 625–631. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.8-9.625>
- Calvin, K., et al., 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Campos, C.A., Machado, E.G.B., Xavier, F.F., n.d. ESTUDO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DO DISTRITO FEDERAL (DF), BRASIL, POR MEIO DE ÍNDICES DE QUALIDADE E FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO.
- Cardoso, R.S., Ribeiro, F.L., 2023. EFEITOS DA CULTURA DE GRÃOS SOBRE A CONSERVAÇÃO DA ÁGUA NO ENTORNO DA FLORESTA NACIONAL DE SILVÂNIA - GO. *Rev. Contemp.* 3, 16445–16459. <https://doi.org/10.56083/RCV3N9-155>
- Cerqueira, M.C., Matricardi, E.A.T., Scariot, A.O., Oliveira, C.H.D., 2021. Fragmentação da paisagem no entorno e na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Nascentes das Geraizeiras, Minas Gerais. *Ciênc. Florest.* 31, 607–633. <https://doi.org/10.5902/1980509826290>
- Cheng, L., Liu, M., Zhan, J., 2020. Land use scenario simulation of mountainous districts based on Dinamica EGO model. *J. Mt. Sci.* 17, 289–303. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5491-y>
- Colman, C.B., Guerra, A., Almagro, A., de Oliveira Roque, F., Rosa, I.M.D., Fernandes, G.W., Oliveira, P.T.S., 2024. Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights the need to account for private property sizes for biodiversity conservation. *Sci. Rep.* 14, 4559.

- <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55207-1>
- Costa-Coutinho, J.M., Jardim, M.A., Farias Castro, A.A.J., Viana-Junior, A.B., 2020. Conexões biogeográficas de savanas brasileiras: partição da diversidade marginal e disjunta e conservação do trópico ecotonal setentrional em um hotspot de biodiversidade. *Rev. Bras. Geogr. Física* 12, 2407–2427. <https://doi.org/10.26848/rbge.v12.7.p2407-2427>
- da Rocha, G.S., Pinheiro, A.V. dos R., Costa, C.E.A. de S., 2020. Water Resource Management in the City of Parauapebas (PA): Usage Assessment, Changes in Scenarios and Possible Impacts. *Res. Soc. Dev.* 9, 1.
- da Silva Arruda, V.L., Alencar, A.A.C., de Carvalho Júnior, O.A., de Figueiredo Ribeiro, F., de Arruda, F.V., Conciani, D.E., da Silva, W.V., Shimbo, J.Z., 2024. Assessing four decades of fire behavior dynamics in the Cerrado biome (1985 to 2022). *Fire Ecol.* 20, 64. <https://doi.org/10.1186/s42408-024-00298-4>
- Destaques do mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil entre 1985 a 2021 - Observatório do Código Florestal, 2022. URL <https://observatorioflorestal.org.br/destaques-do-mapeamento-anual-de-cobertura-e-uso-da-terra-no-brasil-entre-1985-a-2021/> (accessed 11.5.24).
- Dutra, D.J., Elmiro, M. a. T., Ribeiro, S.M.C., 2022. Association between forest resources and water availability: temporal analysis of the Serra Azul stream sub-basin. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 94, e20201289. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220201289>
- Feng, D., Shi, X., Renaud, F.G., 2023. Risk assessment for hurricane-induced pluvial flooding in urban areas using a GIS-based multi-criteria approach: A case study of Hurricane Harvey in Houston, USA. *Sci. Total Environ.* 904, 166891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166891>
- Ferreira, B.M., Soares-Filho, B.S., Pereira, F.M.Q., 2019. The Dinamica EGO virtual machine. *Sci. Comput. Program.* 173, 3–20. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2018.02.002>
- Figueredo, R.R.D., Subtil, L.P., Tasca, B.F., Neves, R. de A., Campos, P.A. dos S., Xavier, F.V., Siqueira, A.J.B., 2019. EXPANSÃO URBANA E DEGRADAÇÃO DE NASCENTES: IDENTIFICANDO PADRÕES ESPAÇO-TEMPORAIS DE UM PROCESSO CRÔNICO EM CUIABÁ, MT. *Nativa* 7, 396–406. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i4.7051>
- Ghosh, A., Kumar, A., Biswas, G., 2024. Chapter 1 - Exponential population growth and global food security: challenges and alternatives, in: Kumar, P., Srivastav, A.L., Chaudhary, V., van Hullebusch, E.D., Busquets, R. (Eds.), *Bioremediation of Emerging Contaminants from Soils*. Elsevier, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13993-2.00001-3>
- Gomes, E., Inácio, M., Bogdzevič, K., Kalinauskas, M., Karnauskaitė, D., Pereira, P., 2021. Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: A review. *Sci. Total Environ.* 781, 146716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146716>
- Hemati, T., Pourebrahim, S., Monavari, M., Baghvand, A., 2020. Species-specific nature conservation prioritization (a combination of MaxEnt, Co\$ting Nature and DINAMICA EGO modeling approaches). *Ecol. Model.* 429, 109093. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109093>
- Henríquez, C., Pontius, R.G., Contreras, P., 2024. Performance of CA_Markov and DINAMICA EGO models to evaluate urban risk in Antofagasta and Mejillones, Chile. *Nat. Hazards* 120, 8411–8435. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06512-5>
- Hurt, G.C., et al., 2020. Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 13, 5425–5464. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020>
- Kuki, C.A.C., Torres, F.L.R., Faria, V.A.D. de, Queiroz, A.R. de, Lima, L.M.M., Lima, J.W.M., 2020. Estratégias de Previsão de Vazão de Curto Prazo: um estudo de caso nas Bacias do Rio Grande e Rio Paranaíba. *Congr. Bras. Automática - CBA* 2. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1479>
- Lima, A.F., Silva, E.G. de A., Iwata, B. de F., 2019. Agriculturas e agricultura familiar no Brasil: uma revisão de literatura. *Retratos Assentamentos* 22, 50–68. <https://doi.org/10.25059/2527-2594/retratosdeassentamentos/2019.v22i1.332>
- Liu, Y., Liu, F., Chen, C., Chen, Q., Zhang, J., Mo, K., Jiang, Q., Yao, S., 2024. A holistic approach to projecting streamflow and analyzing changes in ecologically relevant hydrological indicators under climate and land use/cover change. *J. Hydrol.* 632, 130863. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130863>
- Mabit, R., Araújo, C.A.S., Singh, R.K., Bélanger, S., 2022. Empirical Remote Sensing Algorithms to Retrieve SPM and CDOM in Québec Coastal Waters. *Front. Remote Sens.* 3. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.834908>

- Marques de Oliveira, L., Maria Oliveira da Silva, S., de Assis de Souza Filho, F., Maria Nunes Carvalho, T., Locarno Frota, R., 2020. Forecasting Urban Water Demand Using Cellular Automata. *Water* 12, 2038. <https://doi.org/10.3390/w12072038>
- Martins, A.P., Galvani, E., 2022. Desempenho do algoritmo SEBAL para estimativa de vazão em bacias hidrográficas do Cerrado Brasileiro. *Soc. Nat.* 32, 633–645. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-53169>
- Medeiros, C.K., Rufino, I.A.A., Aragão, R. de, 2024. Consumo de água e crescimento urbano: análises espaciais e relações possíveis. *Urbe Rev. Bras. Gest. Urbana* 16, e20230039. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.016.e20230039>
- Meyfroidt, P., et al., 2022. Ten facts about land systems for sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 119, e2109217118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109217118>
- Militino, A.F., Moradi, M., Ugarte, M.D., 2020. On the Performances of Trend and Change-Point Detection Methods for Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 12, 1008. <https://doi.org/10.3390/rs12061008>
- Nentwich, C., Reinhart, G., 2021. A Combined Anomaly and Trend Detection System for Industrial Robot Gear Condition Monitoring. *Appl. Sci.* 11, 10403. <https://doi.org/10.3390/app112110403>
- Nepstad, D., McGrath, D., Stickler, C., Alencar, A., Azevedo, A., Swette, B., Bezerra, T., DiGiano, M., Shimada, J., Seroa Da Motta, R., Armijo, E., Castello, L., Brando, P., Hansen, M.C., McGrath-Horn, M., Carvalho, O., Hess, L., 2014. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science* 344, 1118–1123. <https://doi.org/10.1126/science.1248525>
- Oliveira, R.M. de, Raposo, L.M., Garcia, R.C., 2024. Transformação do uso e cobertura do solo no cerrado: o impacto do setor agropecuário de 1985 a 2020. *Sigmae* 13, 1–12.
- Oliveira, P.C.S.D.S., Santos, A.M.D., Ferreira, N.C., 2020. MODELAGEM DINÂMICA DO DESMATAMENTO NO SUL DA AMAZÔNIA OCIDENTAL. *Bol. Geogr.* 37, 189–207. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i3.42643>
- Onuchin, A., Burenina, T., Shvidenko, A., Prysov, D., Musokhranova, A., 2021. Zonal aspects of the influence of forest cover change on runoff in northern river basins of Central Siberia. *For. Ecosyst.* 8, 45. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00316-w>
- Ozório, J.M.B., Rosset, J.S., Schiavo, J.A., Panachuki, E., Souza, C.B. da S., Menezes, R. da S., Ximenes, T.S., Castilho, S.C. de P., Marra, L.M., 2019. ESTOQUE DE CARBONO E AGREGAÇÃO DO SOLO SOB FRAGMENTOS FLORESTAIS NOS BIOMAS MATA ATLÂNTICA E CERRADO. *Rev. Bras. Ciênc. Ambient. RBCIAMB* 97–116. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190518>
- Peruchi Trevisan, D., Da Conceição Bispo, P., Almeida, D., Imani, M., Balzter, H., Eduardo Moschini, L., 2020. Environmental vulnerability index: An evaluation of the water and the vegetation quality in a Brazilian Savanna and Seasonal Forest biome. *Ecol. Indic.* 112, 106163. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106163>
- Pinheiro, T.P., Almeida, C.A., Pinheiro, L.M., Valeriano, D.M., Gomes, A.R., Adami, M., Scheide, A., Nogueira, S.H., 2023. The near real-time deforestation detection system: Case study of the DETER system for the Cerrado Biome. *Appl. Earth Sci.* 132, 271–280. <https://doi.org/10.1080/25726838.2023.2265242>
- Piontekowski, V.J., Ribeiro, F.P., Matricardi, E.A.T., Lustosa Junior, I.M., Bussinguer, A.P., Gatto, A., 2019. Modeling Deforestation in the State of Rondônia. *Floresta E Ambiente* 26, e20180441. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.044118>
- Pompeu, J., Assis, T.O., Ometto, J.P., 2024. Landscape changes in the Cerrado: Challenges of land clearing, fragmentation and land tenure for biological conservation. *Sci. Total Environ.* 906, 167581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167581>
- Reis, F.A.F. dos, 2023. A DIMENSÃO DA ÉTICA AGROECOLÓGICA E SUA INFLUÊNCIA NO ENSINO DE CIÊNCIA: UMA APROXIMAÇÃO ENTRE A PRÁXIS AGROECOLÓGICA E OS CONCEITOS DE PRINCÍPIO DE RESPONSABILIDADE EM HANS JONAS E COMPLEXIDADE EM EDGAR MORIN. *Rev. FOCO* 16, e3954–e3954. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n12-130>
- Rodrigues, A.A., Macedo, M.N., Silvério, D.V., Maracahipes, L., Coe, M.T., Brando, P.M., Shimbo, J.Z., Rajão, R., Soares-Filho, B., Bustamante, M.M.C., 2022. Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. *Glob. Change Biol.* 28, 6807–6822. <https://doi.org/10.1111/gcb.16386>

- Rodrigues, H., Soares-Filho, B., 2018. A Short Presentation of Dinamica EGO, in: Camacho Olmedo, M.T., Paegelow, M., Mas, J.-F., Escobar, F. (Eds.), *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer International Publishing, Cham, pp. 493–498. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_35
- Rungee, J., Ma, Q., Goulden, M.L., Bales, R., 2021. Evapotranspiration and Runoff Patterns Across California's Sierra Nevada. *Front. Water* 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.655485>
- Santos, H.G. dos, 2018. *Sistema brasileiro de classificação de solos, 5ª edição revista e ampliada*. ed. Embrapa, Brasília, DF.
- Santos, Y.L.F., Yanai, A.M., Ramos, C.J.P., Graça, P.M.L.A., Veiga, J.A.P., Correia, F.W.S., Fearnside, P.M., 2022. Amazon deforestation and urban expansion: Simulating future growth in the Manaus Metropolitan Region, Brazil. *J. Environ. Manage.* 304, 114279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114279>
- Schleich, A.P., Filho, J.B.R., Lahm, R.A., 2023. Ensino, Meio Ambiente e Sensoriamento Remoto: análise das atividades desenvolvidas. *Rev. Práxis* 15. <https://doi.org/10.47385/praxis.v15.n29.3353>
- Shivanna, K.R., 2022. Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad.* 88, 160–171. <https://doi.org/10.1007/s43538-022-00073-6>
- Silva, E.M., Cangiano, M., Cunha, L., Guiguer, N., 2019. CONDICIONANTES PARA ELABORAÇÃO DE UM MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO RODEADOR, BACIA DO RIO DESCOBERTO/DF, COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS (Conditioning factors for the elaboration of a hydrogeological conceptual model of the Ribeirão Rodeador subwatershed, Descoberto watershed river, Distrito Federal, as a tool for the integrated water resources management). *Rev. Bras. Geogr. Física* 12, 1635. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1635-1648>
- Skea, J., et al., *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1–48. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Upadhyay, R.K., 2020. Markers for Global Climate Change and Its Impact on Social, Biological and Ecological Systems: A Review. *Am. J. Clim. Change* 09, 159–203. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2020.93012>
- Vieira, R.M. da S.P., Tomasella, J., Barbosa, A.A., Polizel, S.P., Ometto, J.P.H.B., Santos, F.C., Ferreira, Y. da C., Toledo, P.M. de, 2021. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. *Sci. Total Environ.* 782, 146900. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146900>
- Woodward, G., Bonada, N., Brown, L.E., Death, R.G., Durance, I., Gray, C., Hladyz, S., Ledger, M.E., Milner, A.M., Ormerod, S.J., Thompson, R.M., Pawar, S., 2016. The effects of climatic fluctuations and extreme events on running water ecosystems. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 371, 20150274. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0274>
- Yang, D., Yang, Y., Xia, J., 2021. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geogr. Sustain.* 2, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>