






Article

Modelo Multitemporal do Uso e Cobertura dos Solos em Microbacias Hidrográficas do Cerrado em Goiás

Jessica Silva dos Reis¹ , Mara Lemke-de-Castro² , Marcos Henrique André-de-Deus³ ,
Renata de Freitas Barroso⁴ , Everton Tizo-Pedroso⁵ 

¹ Mestre. Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais do Cerrado. Laboratório de Diversidade, Comportamento e Conservação de Aracnídeos. Universidade Estadual de Goiás (UEG). ORCID: 0000-0002-0147-879X. E-mail: reisbio@yahoo.com.br

² Doutora. Saneago de Goiás. Morrinhos. Goiás. ORCID: 0000-0002-3281-3044. E-mail: maralemke.castro@gmail.com

³ Especialista. Colégio Estadual da Polícia Militar Dr. Belém. Bela Vista. Goiás. Brasil. ORCID: 0009-0007-0535-0906. E-mail: mandrededeus@gmail.com

⁴ Mestre. Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais do Cerrado. Laboratório de Diversidade, Comportamento e Conservação de Aracnídeos. Universidade Estadual de Goiás (UEG). ORCID: 0000-0002-0552-7499. E-mail: renatabarroso.bio@gmail.com

⁵ Doutor. Laboratório de Diversidade, Comportamento e Conservação de Aracnídeos. Centro de Ensino e Aprendizagem em Rede. Universidade Estadual de Goiás. ORCID: 0000-0001-7064-2103. E-mail: tizopedroso@ueg.br

RESUMO

As transformações fisionômicas e climáticas têm gerado impactos econômicos e ambientais, como a recente crise hídrica na bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte. Para mitigar esses efeitos e diagnosticar o uso e a cobertura do solo são empregadas ferramentas de sensoriamento remoto. Este estudo objetivou avaliar o uso histórico, atual e futuro da terra e a cobertura do solo em microbacias afluentes do Rio Meia Ponte, no período de 1986 a 2041, fornecendo dados de referência para medidas de preservação e conservação dessa bacia, essencial para o estado de Goiás. As projeções futuras utilizaram imagens georreferenciadas dos satélites Landsat 8 e 9, associadas a classes e variáveis espaciais. As classificações basearam-se no Manual Técnico do IBGE (2013) e foram avaliadas pelos métodos randômicos kappa e de acurácia total. Os resultados indicaram variações nos padrões geográficos e econômicos nas microbacias da Mata, Formiga e Serra. Observou-se tendência de aumento significativo de áreas de pastagem, cultivo e atividades urbanas nos cenários futuros, com consequente redução da cobertura florestal e dos corpos d'água. A maior parte do território destinado ao sistema agropastoril foi consolidada conforme a Lei nº12.651/2012, enquanto a vegetação restante ficou limitada a pequenas áreas, principalmente próximas a cursos d'água. A redução da vazão ou o desaparecimento de drenagens é atribuída à pressão antrópica, evidenciando a necessidade de gestão hídrica. Esses resultados reforçam a urgência de conservar a diversidade local e implementar medidas de reconstituição ambiental para mitigar a crise hídrica regional.

Palavras-chave: crise hídrica; degradação ambiental; geoprocessamento; mudanças ambientais.

ABSTRACT

Physiognomic and climatic transformations have caused economic, and environmental issues, such as the recent water crisis in the Meia Ponte River Basin. To mitigate these impacts and assess land use and cover conditions, remote sensing tools have been employed. This study aimed to evaluate the current and future land use and soil cover in tributary micro-basins of the Meia Ponte River between 1986 and 2041, providing reference data for preservation and conservation measures of this important basin for the state of Goiás, Brazil. For future projections, georeferenced images from the Landsat 8 and 9 satellites were used, combined with class associations and spatial variables. The classifications were based on the IBGE Technical Manual (2013) and assessed using random kappa and overall accuracy methods. The results indicated variations in geographical and economic patterns across the Serra, Formiga, and Mata micro-basins. There was a significant increase in pasture, cultivation, and urban activities in the predicted scenarios, leading to a



Submissão: 26/10/2023



Aceite: 23/09/2024



Publicação: 14/11/2024



reduction in forest cover and water bodies. Most of the territory designated for agropastoral systems was consolidated according to Law 12,651/2012, with the remaining vegetation confined to genetic and geographic islands, mainly near watercourses. The decrease in flow or the disappearance of drainage courses is due to anthropogenic pressures, highlighting the need for water management. These findings emphasize the urgency of conserving local species diversity and implementing priority environmental restoration measures to mitigate the local and regional water crisis.

Keywords: water crisis; environmental degradation; geoprocessing; environmental change.

Introdução

A bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte está inserida na região do Rio Paranaíba, no centro-sul do estado de Goiás, Brasil (Rosa et al. 2023). Com uma área de 14.521,8 km², e integrando o Cerrado central, a bacia é crucial para o abastecimento hídrico e apresenta alto nível de antropização (Souza et al. 2024). Nas últimas décadas, a bacia sofreu intensas transformações na cobertura e no uso do solo, impulsionadas principalmente pela expansão agrícola e pelo desenvolvimento urbano, especialmente na região metropolitana de Goiânia (Borges & Oliveira 2021). Essas mudanças geram impactos significativos na biodiversidade e comprometem os serviços ecossistêmicos e a qualidade e disponibilidade da água (Karimi & Sultana 2024).

A expansão das alterações no uso da terra na bacia do Rio Meia Ponte reflete uma tendência mais ampla observada em todo o Cerrado (Colman et al. 2024). Esse fenômeno evidencia a importância de se estudar a dinâmica de uso e cobertura da terra no bioma, o que proporciona uma visão abrangente da evolução ambiental e das atividades humanas ao longo do tempo, permitindo a identificação dos impactos em escalas local, regional e nacional (Souza et al. 2020). Essas mudanças são detectadas com alta precisão por meio de imagens de satélite, que são processadas e analisadas com base em variáveis estatísticas, geográficas e biológicas (Chaminé et al. 2021).

As técnicas de sensoriamento remoto e modelagem têm se mostrado eficazes, pois permitem ampliar as áreas de estudo sem aumento significativo de custos (Tian et al. 2023). Dependendo dos objetivos da pesquisa, essas ferramentas permitem uma visão histórica da evolução dos impactos ambientais (Silva et al. 2021), sendo eficientes tanto em análises espaço-temporais diretas quanto indiretas (Gomes et al. 2021). Essas análises são particularmente importantes no Cerrado, onde transformações em diferentes escalas podem acelerar a perda de espécies endêmicas (Fushimi et al. 2024). Compreender as relações bióticas e abióticas nesse *hotspot* de biodiversidade (Santos et al. 2022) é essencial para monitorar as dinâmicas das comunidades biológicas e definir estratégias de conservação adequadas (Klink et al. 2020). O monitoramento dos recursos naturais do Cerrado é, portanto, vital para preservar sua biodiversidade e promover o desenvolvimento sustentável da economia e da sociedade (Gabriel et al. 2022).

Monitorar as mudanças espaciais e temporais no Cerrado é um desafio devido às suas variações fitofisionômicas e à acentuada sazonalidade, especialmente associadas à diversidade vegetal (Colman et al. 2024). A escassez de dados censitários e ambientais de qualidade também limita as iniciativas de monitoramento (Herrmann et al. 2022). Nesse contexto, as ferramentas de geoprocessamento podem ser a melhor estratégia para que o Brasil atinja a meta de aumentar a cobertura de vegetação protegida no Cerrado, de 3% para 17%, conforme o tratado da Convenção sobre Diversidade Biológica (Robinson et al. 2024).

Em 2009, a Lei n^o12.187, que instituiu a Política Nacional de Mudanças do Clima (PNMC), em conjunto com a Convenção-Quadro das Nações Unidas (UNFCCC), comprometeu o Brasil a reduzir em 40% o desmatamento anual do Cerrado (Cabral & Gurgel 2014; Luiz & Steinke 2022). No entanto, o documento de Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC) ao Acordo de Paris, de 2015, não incluiu o Cerrado como prioridade para a contenção do desmatamento (Gallo & Albrecht 2019). Entre 2011 e 2015, a degradação no Cerrado superou a da Floresta Amazônica, tornando-o o bioma mais ameaçado do mundo (Bolson 2018). O Cerrado também não foi mencionado diretamente nas metas de Aichi para 2025-2030, pois o Brasil já havia



alcançado a meta de reduzir o desmatamento anual em 40% (UICN et al. 2011). No estado de Goiás, apenas 1% da vegetação natural é preservada, evidenciando que as perdas da flora superaram a capacidade de regeneração dos ecossistemas (Costa 2020; Marques et al. 2020).

O Relatório Anual do Desmatamento do Brasil, referente a 2020, indicou que, de 79% (1.385,3 mil ha) dos alertas de desmatamento, 31% (432 mil ha) ocorreram no Cerrado, ficando atrás apenas da Amazônia (Azevedo et al. 2021). Nos últimos anos, o aumento do desmatamento e das queimadas resulta de monitoramento inadequado e de intervenções públicas insuficientes, muitas vezes influenciadas por conflitos de interesse econômico (Foli & Faria 2020). Diante desse cenário, os objetivos deste estudo foram: (1) identificar os principais fatores de ameaça relacionados às mudanças ambientais naturais e artificiais; (2) categorizar as fontes e indicadores de pressão antrópica sobre as tipologias de uso do solo e a heterogeneidade biológica nas áreas de galeria da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte e do Cerrado sul goiano; e (3) estimar, por meio de modelagem teórica, a perda de áreas naturais em função das mudanças simuladas de uso e cobertura do solo até o ano de 2041.

Material e Métodos

Localização geográfica da área de estudo

A área de estudo incluiu seções de corpos d'água afluentes da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte. Foram selecionados três gradientes amostrais próximos, com base na rede de drenagem mapeada pela Agência Nacional de Águas. As microbacias hidrográficas da Mata, Formiga e da Serra estão localizadas entre os municípios de Morrinhos e Piracanjuba, no estado de Goiás, entre as coordenadas 49°21'00.28"O e 17°80'59.87"S, e 49°9'6.26"O e 17°27'25.63"S, na microrregião Meia Ponte (Figura 1).

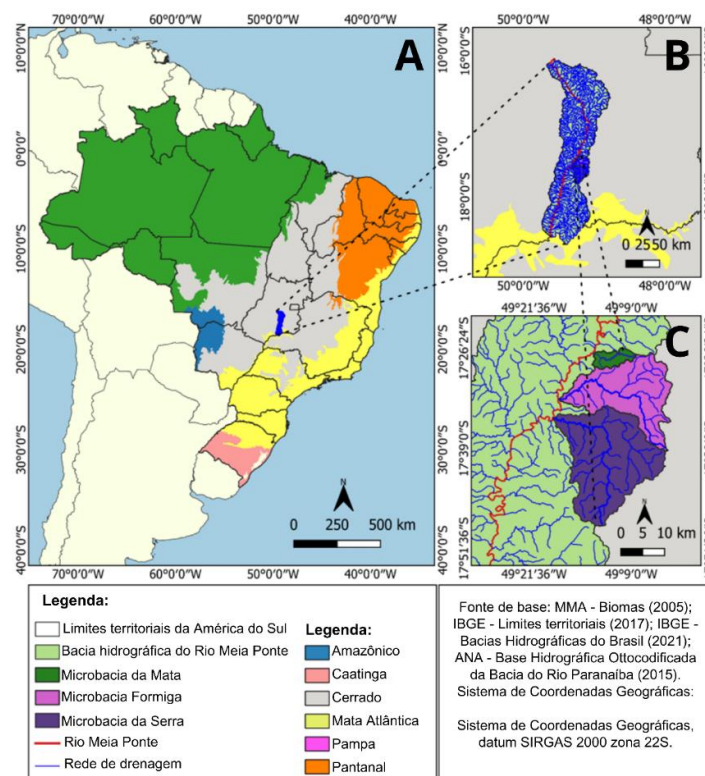


Figura 1. Localização das microbacias da Mata, Formiga e da Serra. (A) Localização da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte em nível nacional, destacando sua delimitação nos biomas brasileiros; (B) Posição da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte nos biomas Cerrado e Mata Atlântica; (C) Área focal das microbacias da Mata, Formiga e da Serra, com destaque para as delimitações territoriais e linhas de drenagem. Fonte: Elaborado pelos autores.



Coleta e classificação de dados espaciais

Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 4 e 5, sensor Thematic Mapper (TM), para os anos de 1986 e 2003, e imagens dos satélites Landsat 8 e 9, sensor Operational Land Imager (OLI), para 2021. As imagens, com menos de 20% de cobertura de nuvens, foram obtidas na plataforma USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), com resolução espacial de 30 m. Todas as imagens foram projetadas no sistema de coordenadas UTM, datum Sirgas 2000, zona 22S.

O processamento foi realizado no software QGIS 3.16 (Developer 2020), e a projeção futura para o ano de 2041 foi desenvolvida usando o plugin MOLUSCE no QGIS 2.18 (Nextgis 2018). Antes da validação da projeção, foi empregada a interpretação visual das imagens para as três áreas de estudo.

Foram definidas sete classes de cobertura do solo: (1) Corpos de água; (2) Ripária; (3) Florestal; (4) Savana; (5) Cultivo; (6) Pastagem; e (7) Urbanizada/Rodovia (Anexo I. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.27088351.v1>), conforme o Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE (2013). A composição colorida foi obtida através da mesclagem das bandas B2 (Azul), B3 (Verde), B4 (Vermelho) e B5 (Infravermelho), com avaliação pela falsa cor e multibanda colorida (combinação 4-3-2).

Criação de mapas e variáveis espaciais

Foram gerados cinco mapas de variáveis espaciais: valor da terra, hipsometria, declividade, distância da malha viária e distância das linhas de drenagem. O valor da terra foi calculado a partir de dados da Secretaria de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SEAPA), com interpolação por Krigagem no plugin Smart-Map.

As variáveis de distância da malha viária e dos corpos d'água foram geradas pelo módulo *r.grow.distance* do GRASS, utilizando dados do IBGE. A declividade foi obtida a partir de uma imagem SRTM, com classes de relevo adaptadas pela Embrapa: plano (0–3%), suave-ondulado (3–8%), ondulado (8–20%), forte-ondulado (20–45%), montanhoso (45–75%) e escarpado (>75%) (Embrapa 1979). O cálculo da declividade foi feito pelo módulo *r.slope.aspect* do banco de dados TOPODATA. A hipsometria foi gerada a partir de uma imagem raster do TOPODATA, e os limites da área foram definidos com base em *shapefiles* do IBGE.

Análise de uso da terra e projeção futura

A análise de variação no uso da terra ao longo do tempo seguiu três etapas. Inicialmente, o plugin MOLUSCE foi usado para processar os mapas de cobertura e uso do solo, em formato raster, referentes aos anos de 1986, 2003 e 2021. Em seguida, foi avaliada a correlação entre os mapas para entender a influência das variáveis espaciais nas mudanças de uso do solo. A última etapa consistiu na análise de mudança de área, que comparando o uso da terra em dois períodos: 1986–2003 e 2003–2021. Com os resultados, foram realizadas simulações das mudanças futuras até o ano de 2041.

Validação e análise de acurácia

O desempenho da classificação das imagens foi avaliado pelos métodos do coeficiente kappa e da acurácia total (Andrade et al. 2022; Cohen 1960). Os valores de kappa foram interpretados da seguinte forma: ≤ 0 = ruim, 0–0,2 = regular, 0,41–0,6 = moderado, 0,61–0,8 = bom, 0,81–1,0 = muito bom (Cohen 1960). Para a acurácia, valores $\leq 0,70$ indicaram maiores variações nas simulações, enquanto valores $> 0,70$ demonstraram maior precisão e probabilidade de ocorrência no ambiente real (Andrade et al. 2022).



Resultados

Classificação do Uso e Cobertura da Terra: Microbacia Hidrográfica da Serra (1986 a 2021)

A análise pelo método randômico do coeficiente kappa revelou boa classificação dos mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 1986, 2003 e 2021. Os valores de kappa (overall: 0,82%, histo: 0,86%, loc.: 0,86%) indicam representação confiável das características geográficas e estatísticas da área. A acurácia total de 87,82% reforça a qualidade das camadas e a confiabilidade do modelo de simulação futura.

Em 1986, a vegetação natural representava 61,7% da área da microbacia da Serra, distribuída em 37,54% de vegetação ripária, 22,42% de vegetação florestal e 1,74% de savana (Tabela 1). Entre 1986 e 2003, essa categoria sofreu redução de 26,61%, mas entre 2003 e 2021, houve aumento de 2,59%.

As áreas antrópicas não agrícolas, principalmente pastagens, cobriam 20,65% da área em 1986. A pastagem apresentou leve decréscimo de 0,12% entre 1986 e 2003, seguido por aumento significativo de 27,01% entre 2003 e 2021. Por outro lado, as áreas urbanizadas e rodovias, tiveram aumento de 1,04% entre 1986 e 2003, com subsequente redução de 0,75% entre 2003 e 2021.

As áreas agrícolas cobriam 17,57% da microbacia em 1986. Entre 1986 e 2003, essa área aumentou em 39,25%, mas sofreu redução de 33,09% entre 2003 e 2021. Já os corpos d'água, que representavam apenas 0,07% da área em 1986, aumentaram para 3,60% até 2003, mas diminuíram 1,87% até 2021.

Tabela 1 – Matriz de transição e variação do uso do solo na microbacia da Serra em 1986, 2003 e 2021.

Classes	Área (ha)			Área (%)			Δ (ha)		Δ (%)	
	1986	2003	2021	1986	2003	2021	1986-2003	2003-2021	1986-2003	2003-2021
1	30,69	1520,46	745,20	0,07	3,67	1,8	1489,77	-775,26	3,60	-1,87
2	15534,09	4523,85	5594,13	37,54	10,93	13,52	-11010,24	1070,28	-26,61	2,59
3	9274,77	2784,06	5365,98	22,42	6,73	12,97	-6490,71	2581,92	-15,69	6,24
4	719,91	112,32	59,94	1,74	0,27	0,14	-607,59	-52,38	-1,47	-0,13
5	7271,19	23510,52	9818,82	17,57	56,82	23,73	16239,33	-13691,70	39,25	-33,09
6	8429,67	8379,09	19556,28	20,37	20,25	47,27	-50,58	11177,19	-0,12	27,01
7	114,39	544,41	234,36	0,28	1,32	0,57	430,02	-310,05	1,04	-0,75

Fonte: Elaborado pelos autores.

Classificação do Uso e Cobertura da Terra: Microbacia Hidrográfica da Formiga (1986 a 2021)

Os valores de kappa para os anos de 1986, 2003 e 2021 foram 0,82, 0,85 e 0,84, indicando ótima qualidade de classificação, corroborada pela acurácia de 85,42%. Em 1986, a pastagem foi a classe predominante, ocupando 51,65% da área. No entanto, houve uma redução de 42,52% entre 1986 e 2003, seguida por um aumento de 9,68% até 2021 (Tabela 2).

As áreas de vegetação natural representavam 34,86% da microbacia em 1986. A vegetação ripária cobria 16,39% dessa área, mas sofreu redução de 9,56% ao longo do período até 2003, com posterior aumento de 2,45% até 2021. A vegetação florestal cobria 13,56% da área em 1986, com diminuição de 2,55% até 2003 e acréscimo de 2,19% até 2021. A savana ocupava 4,91% da área em 1986, com reduções contínuas de 4,63% e 0,16% nos períodos subsequentes.



Tabela 2 – Matriz de transição e variação do uso do solo na microbacia Formiga em 1986, 2003 e 2021.

Classes	Área (ha)			Área (%)			Δ (ha)		Δ (%)	
	1986	2003	2021	1986	2003	2021	1986-2003	2003-2021	1986-2003	2003-2021
1	153,36	409,68	119,16	0,55	1,48	0,43	256,32	-290,52	0,93	-1,05
2	4536,18	1890,27	2570,49	16,39	6,83	9,29	-2645,91	680,22	-9,56	2,46
3	3752,73	3047,94	3655,08	13,56	11,01	13,21	-704,79	607,14	-2,55	2,19
4	1359,00	78,48	32,94	4,91	0,28	0,12	-1280,52	-45,54	-4,63	-0,16
5	3362,94	19438,20	15905,61	12,15	70,23	57,46	16075,26	-3532,59	58,08	-12,76
6	14296,14	2527,56	5206,50	51,65	9,13	18,81	-11768,58	2678,94	-42,52	9,68
7	218,88	287,10	189,45	0,79	1,04	0,68	68,22	-97,65	0,25	-0,35

Fonte: Elaborado pelos autores.

A área agrícola aumentou de 12,15% em 1986 para 58,08% em 2003, e depois diminuiu 12,76% até 2021 (Tabela 2). Por fim, os corpos d'água representavam 0,55% da área em 1986, com aumento de 0,93% até 2003 e redução de 1,05% entre 2003 e 2021.

Classificação do Uso e Cobertura da Terra: Microbacia Hidrográfica da Mata (1986 a 2021)

Os valores de kappa para a microbacia da Mata foram 0,77, 0,79 e 0,76 para os anos de 1986, 2003 e 2021, respectivamente, indicando boa classificação, apesar de valores ligeiramente inferiores em comparação às outras microbacias. A acurácia foi de 75%, corroborando a qualidade da classificação.

Tabela 3 – Matriz de transição e variação do uso do solo na microbacia da Mata em 1986, 2003 e 2021.

Classes	Área (ha)			Área (%)			Δ (ha)		Δ (%)	
	1986	2003	2021	1986	2003	2021	1986-2003	2003-2021	1986-2003	2003-2021
1	0,45	7,11	6,12	0,01	0,23	0,20	6,66	-0,99	0,22	-0,03
2	334,26	341,01	341,37	10,97	11,19	11,20	6,75	0,36	0,22	0,01
3	1311,66	550,62	806,40	43,05	18,07	26,47	-761,04	255,78	-24,98	8,39
4	689,49	33,93	6,12	22,63	1,11	0,20	-655,56	-27,81	-21,52	-0,91
5	490,59	1089,72	980,10	16,10	35,76	32,17	599,13	-109,62	19,66	-3,60
6	212,13	958,50	858,60	6,96	31,46	28,18	746,37	-99,90	24,50	-3,28
7	8,37	66,06	48,24	0,27	2,17	1,58	57,69	-17,82	1,89	-0,58

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em 1986, a vegetação natural cobria 76,65% da área, com destaque para a vegetação florestal, que ocupava 43,05%, sofrendo redução de 24,98% até 2003 e aumento de 8,40% até 2021. As savanas, por sua vez, cobriam 22,63% da área em 1986, mas apresentaram redução significativa de 21,52% até 2003 e queda de 0,913% até 2021. As matas ripárias cobriam 10,97% da área em 1986, com aumento de 0,01% até 2021, sem interrupção no crescimento.

As áreas de cultivo aumentaram de 16,10% em 1986 para 35,76% em 2003, com posterior redução de 32,17% até 2021. As áreas não agrícolas cobriam 7,23% em 1986, enquanto as pastagens ocupavam 6,96%. Essas áreas tiveram aumento para 31,46% até 2003 e redução de 28,18% até 2021. As áreas urbanizadas cobriam 0,27% da área em 1986, aumentando 2,17% até 2003 e apresentando queda de 1,58% até 2021. Da



mesma forma, os corpos d'água, que cobriam 0,01% da área em 1986, aumentaram para 0,23% até 2003, antes de diminuir para 0,20% até 2021 (Tabela 3).

Cenários Futuros para as Microbacias (Mata, Formiga e Serra)

As projeções para o ano de 2041 indicam que as microbacias da Serra e Formiga tendem a apresentar aumento expressivo nas áreas de pastagem, em detrimento do cultivo. Esse padrão reflete intensificação nas atividades pecuárias nessas regiões da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte, ao passo que as áreas de agrícolas mostram declínio gradual. O comportamento observado sugere que as áreas destinadas à pastagem continuarão aumentando, resultando em uma maior ocupação territorial por pastagens até 2041.

Na microbacia da Mata, observa-se tendência inversa, com redução das áreas destinadas à pecuária e agricultura, acompanhada pelo aumento da cobertura vegetação natural (Figura 2). Esse fenômeno pode estar relacionado à expansão agrícola para áreas de relevo mais baixo e de maior extensão, enquanto as áreas próximas à hidrelétrica do Rochedo, tendem a receber fiscalização ambiental e esforços de conservação mais intensificada.

As análises de risco de desabastecimento para 2041 indicam que, sem um monitoramento eficaz, todas as microbacias podem enfrentar alto risco de consumo acima da vazão Qmed. A microbacia da Mata, no entanto, apresenta menor risco devido às características naturais e à proximidade com áreas monitoradas. Já a microbacia Formiga, especialmente na zona norte de Morrinhos, onde córregos como Bom Jardim, Cortado Barreirinho e a nascente do ribeirão Formiga, pode enfrentar alto risco de desabastecimento. Enquanto a microbacia da Serra mostra risco elevado nas regiões próximas aos córregos Café e Chaves (Figura 4).

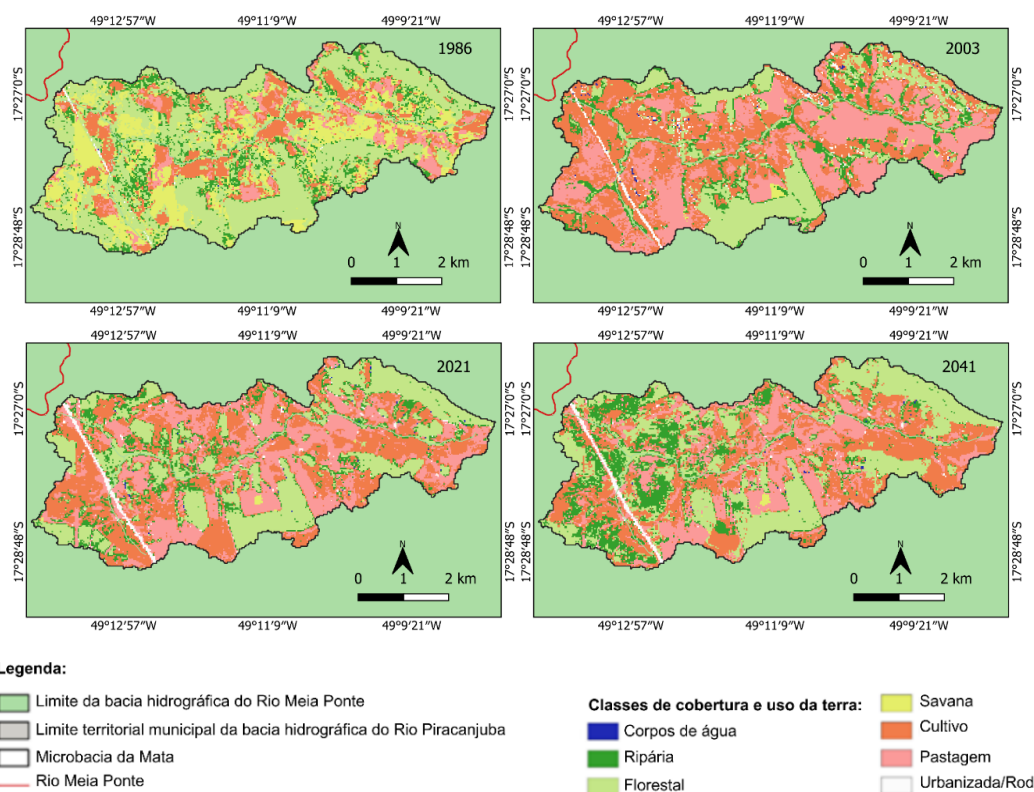


Figura 2. Modelo digital das mudanças na cobertura uso do solo na microbacia da Mata de 1986 a 2041. Fonte: Elaborado pelos autores.



De maneira geral, as áreas próximas a zonas urbanas, rodovias e atividades agropecuárias apresentam os maiores riscos de redução da disponibilidade de água. A fragmentação de habitats e a predominância de pastagens e cultivos são fatores que contribuem para o aumento desse risco (Figuras 2, 3 e 5).

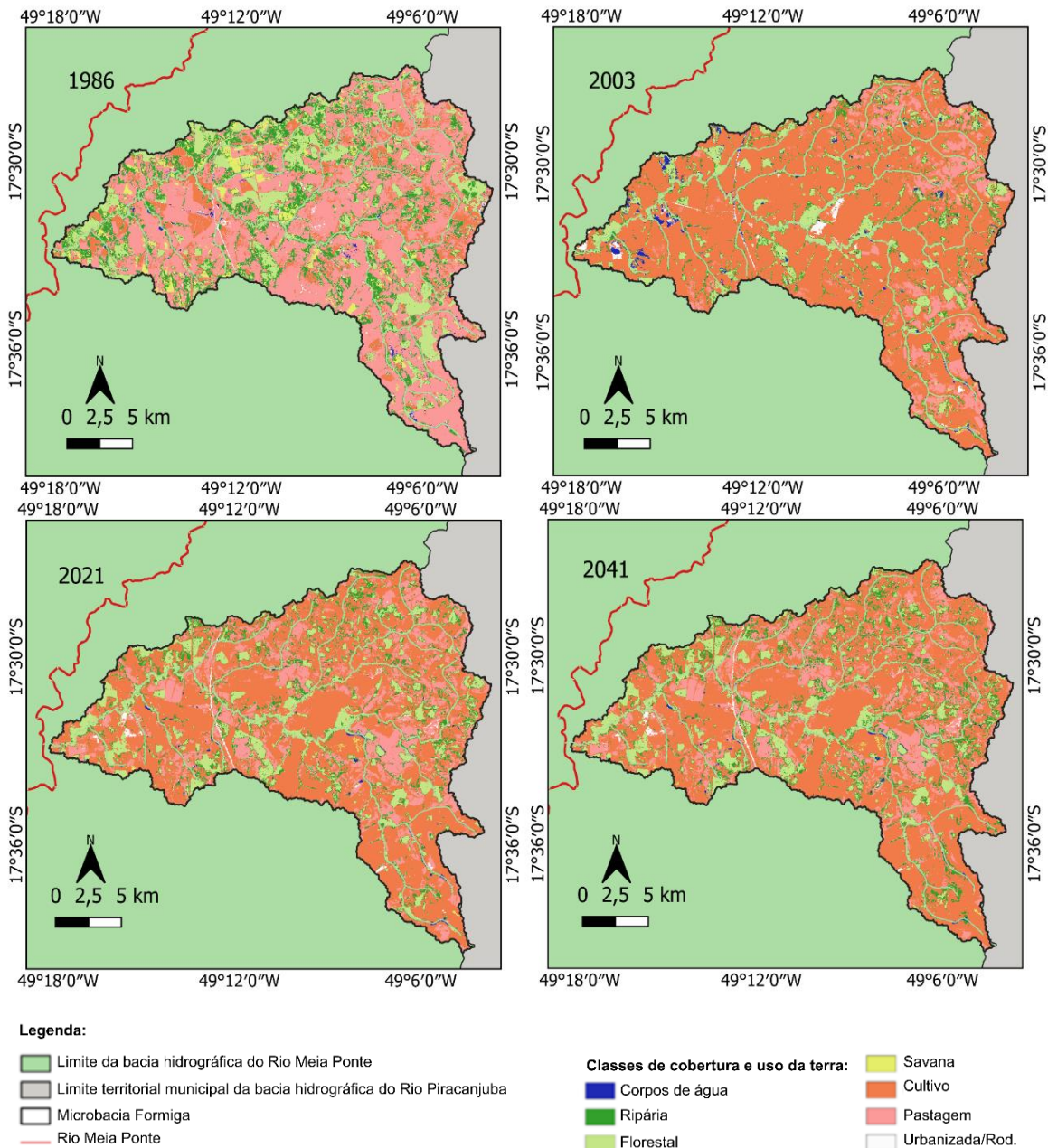


Figura 3. Modelo digital das mudanças na cobertura uso do solo na microbacia Formiga de 1986 a 2041. Fonte: Elaborado pelos autores.

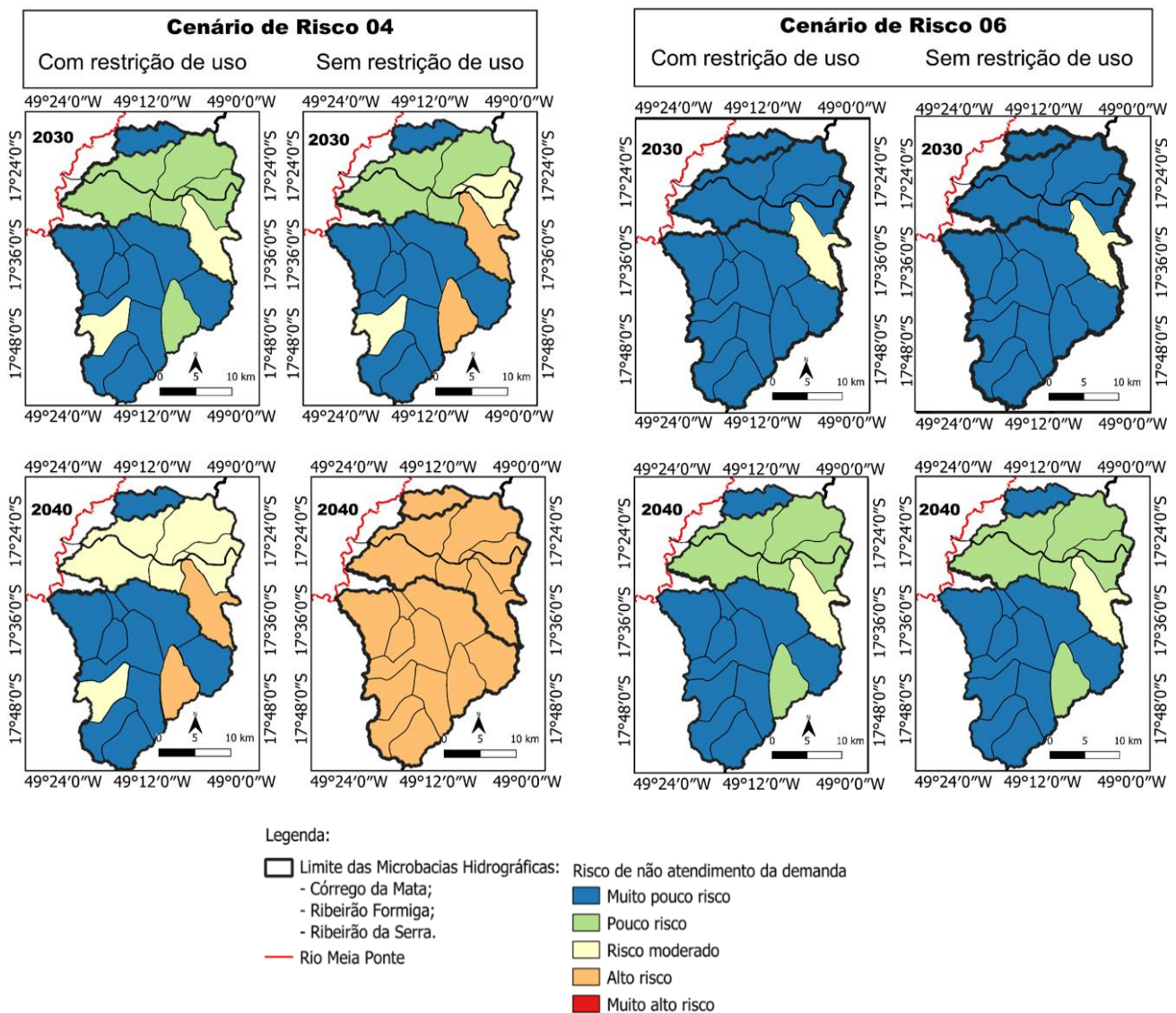


Figura 4. Níveis dos cenários de risco para redução do consumo de água das microbacias hidrográficas da Mata, Formiga e Serra localizadas na mesorregião do Meia Ponte. *Cenário 4 reflete os períodos de maior consumo de água em detrimento as ações antrópicas atuais na região, enquanto o Cenário 6 considera os períodos de menor consumo de água. Fonte: Soares et al. (2020).

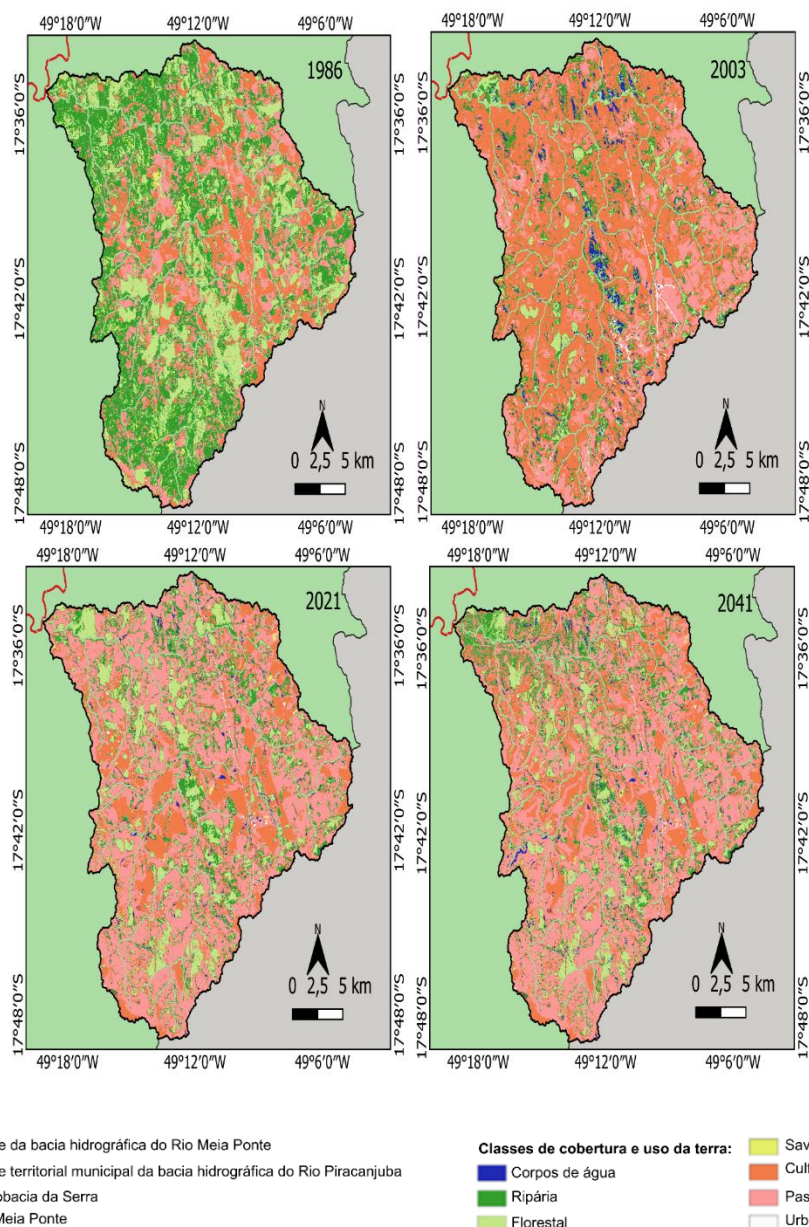


Figura 5. Modelo digital das mudanças da cobertura e uso do solo na microbacia da Serra em 1986 a 2041. Fonte: Elaborado pelos autores.

Discussão

Historicamente, o desmatamento do Cerrado, proporcionalmente, supera o da Amazônia, mas, sem incentivos econômicos e governamentais, apenas 22% da área foi legalmente protegida (Hofmann et al. 2021). No sul de Goiás, 64% das áreas nativas foram convertidas para atividades agropecuárias, com uma expansão de 19% entre 1980 e 1995, resultando na conversão de áreas em pastagens (Landau et al. 2013; Marcuzzo et al. 2012; Margulis 2003). Esta tendência de degradação, impulsionada pela agricultura, especialmente o cultivo de soja, milho, sorgo e cana-de-açúcar, tem impactado as florestas remanescentes e a biodiversidade local (Cordeiro et al. 2015; Lima et al. 2021). Nossos dados corroboram esses padrões, indicando que entre 1980 e 2021, 64% da vegetação natural nas microbacias estudadas foram convertidas em áreas de pastagens e outras atividades agropecuárias, resultando na perda expressiva da flora.

Essas transformações no uso do solo refletem uma pressão intensificada nos recursos naturais da bacia do Rio Meia Ponte e afluentes das microbacias Mata, Formiga e Serra. A conversão contínua de suas áreas ripárias



remanescentes em pastagens, terras agrícolas associadas a baixa disponibilidade hídrica e aumento do consumo de água para irrigação e outros usos (Majumdar & Avishek 2023), tem agravado o estresse hidrológico na região ao longo dos últimos 40 anos. Sem intervenções imediatas na gestão dos recursos hídricos e na conservação das áreas remanescentes, a tendência é não apenas reduzir a diversidade florística, mas também fragmentar habitats críticos (Liesenbergh et al. 2007; Lima & Almeida 2017; Rosemback et al. 2010).

A precipitação também exerce influência na dinâmica da vegetação das microbacias do Rio Meia Ponte. As variações na precipitação e na disponibilidade de hídrica têm afetado a capacidade de recuperação das áreas degradadas, conforme cenários observados em nossa pesquisa. Durante períodos de seca, a baixa disponibilidade de água agrava o estresse hídrico, comprometendo o desenvolvimento das plantas (Ilyas et al. 2021). Intensifica as condições de degradação e fragmentação dos ecossistemas, especialmente nas áreas mais impactadas pelas atividades agropecuárias (Kapoor et al. 2020).

Atualmente, restam apenas 33% das áreas nativas do Cerrado goiano (Carvalho et al. 2008), embora ecologicamente comprometidas. É a ausência de uma abordagem integrada no manejo dos recursos naturais, especialmente nas áreas consolidadas pela Lei nº 12.651 de 2012, resultou na remoção da maior parte da vegetação nativa, incluindo áreas de preservação permanente, entre 1986 e 2003. Essas áreas, agora legalizadas pela Lei nº 12.651, tiveram seus proprietários beneficiados pela anistia que receberam (Guimarães et al. 2024). A anistia foi concedida por crimes ambientais relacionados à degradação da vegetação em reservas legais e permanentes, como as matas ripárias, independentemente do seu tamanho ou importância ambiental (Bousfield & Rodrigues-Filho 2024; Brasil 2012; Rodrigues 2013). Nossos resultados que mostram o aumento da vegetação nas áreas desmatadas após a anistia de 2008 foi limitado, inferior a 47,87%. Além disso, observamos redução da cobertura vegetal em outros trechos avaliados, o que demonstra que os esforços de recuperação ainda estão aquém das demandas ecológicas *in loco*.

A situação das áreas ripárias remanescentes é particularmente preocupante, configurando uma crise ecológica. Áreas vulneráveis, como as matas ripárias e as floretas remanescentes, demandam atenção especial, pois são altamente suscetíveis à degradação no Cerrado (Colli et al. 2020; Yirigui et al. 2019); e desempenham papel fundamental na manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos (Klink et al. 2020). As projeções para os anos de 2030 e 2040, tanto o cenário de maior consumo de água (Cenário 04) e de menor consumo (Cenário 06) indicam escassez severa de recursos hídricos. Esses cenários projetam que o Rio Meia Ponte pode enfrentar um aumento no consumo de 78 a 247%, principalmente nos afluentes menores (Soares et al. 2020). O cenário 04 está mais alinhado com os resultados encontrados, dada a semelhança no agravamento dos danos ambientais previstos nas projeções futuras.

Em resposta a situação crítica na bacia do Rio Meia Ponte, o Decreto Estadual nº 9.872 de 2021 estabelece medidas de controle, priorizando a recuperação hídrica (Goiás 2021). O decreto prevê a restrição e/ou suspensão de atividades agropecuárias, industriais, comerciais e de lazer durante períodos críticos de escassez de água. Ele priorizar o consumo humano e de animais, além de assegurar o fornecimento elétrico para os municípios goianos.

Conclusão

A avaliação multitemporal realizada neste estudo destaca que os principais fatores de ameaça à biodiversidade local estão diretamente associados ao predomínio de áreas de pastagem, lavouras e à redução hídrica. Neste contexto, as mudanças climáticas, associadas ao sistema agrossilvopastoril, têm influenciado significativamente a estrutura das formações vegetais remanescentes nas microbacias estudadas. Verificou-se,



ainda, que as áreas ripárias estão sob maior pressão, o que ressalta a importância de estratégias de conservação nas APPs.

Além dessas questões naturais, a análise revelou o impacto das intervenções antrópicas, especialmente o uso intensivo da terra para atividades agrícolas e pecuárias, que exacerbou os problemas ambientais, como a redução hídrica. Observou-se, que a maior parte das áreas destinadas à expansão agropecuária foram consideradas consolidadas pela Lei n. 12.651 de 2012, por terem sido convertidas antes de 2003, e, portanto, anistiadas pela legislação que revogou os crimes ambientais até 2008.

Nossos cenários demonstram que, sem a implementação efetiva de políticas de conservação e restauração ambiental, a integridade ecológica da bacia do Rio Meia Ponte e seus afluentes continuará a se deteriorar. A conversão massiva de áreas nativas e a fragmentação de habitats criam uma projeção alarmante para a biodiversidade local e para a segurança hídrica das comunidades dos municípios de Piracanjuba e Morrinhos, Goiás.

As projeções do estudo reforçam a necessidade de um monitoramento contínuo e rigoroso dos recursos hídricos da bacia do Rio Meia Ponte, já observados em ampla escala para o Cerrado. O acompanhamento periódico da vazão hídrica, deverá ser realizada nas áreas urbanas e rurais, a fim de mitigar possíveis crises de desabastecimento para a fauna, flora e população humana.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Naturais do Cerrado da Universidade Estadual de Goiás e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos também à Profa. Daniela Inácio Junqueira e à Profa. Dra. Solange Xavier dos Santos pelas valiosas contribuições nas etapas anteriores do manuscrito. Ao Me. Edwin Bedoya Roqueme, expressamos nossa gratidão pelos ensinamentos em modelagem e geoprocessamento, fundamentais para elaboração dos mapas espaço-temporais.

Referências

Andrade GB, Silva-Rocha K, Hid AR, Dueti LdSM, Silva-Reis F 2022. Análise espaço temporal das alterações de uso e cobertura da terra na Bacia do Igarapé São Francisco, Rio Branco - Acre - Brasil (2001 - 2021). *UÁQUIRI: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia* 04:139-151

Azevedo T, Rosa MR, Shimbo JZ, Oliveira MG 2021. Relatório Anual do Desmatamento no Brasil-2020. *São Paulo: MapBiomias*:93

Bolson SH 2018. O Cerrado nas metas brasileiras do Acordo de Paris: a omissão do Estado brasileiro com o desmatamento na cumeieira da América do Sul. *Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo* 4:112-131

Borges VS, Oliveira WN 2021. Análise multitemporal do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil* 17:79-93 doi:<https://doi.org/10.5216/reec.v17i1.68192>

Bousfield R, Rodrigues-Filho JL 2024. Lei nº 14.285/21: Lei posterior ao Código Florestal e menos protetiva ao meio ambiente. *PerCursos* 25:e0503 doi:<https://doi.org/10.5965/19847246252024e0503>



- Brasil 2012. Lei N° 12.651, de 25 de maio de 2012. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Accessed 21 de abril 2022
- Cabral C, Gurgel ÂC 2014. Análise econômica da limitação do desmatamento no Brasil utilizando um modelo de equilíbrio geral computável. *Anais do XLI Encontro Nacional de Economia ANPEC-Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia*:1-20
- Carvalho FA, Rodrigues VHP, Kilca RV, Siqueira AS, Araújo GM, Schiavini I 2008. Composição florística, riqueza e diversidade de um cerrado sensu stricto no sudeste do estado de Goiás. *Bioscience journal* 24:64-72
- Chaminé HI, Pereira AJSC, Teodoro AC, Teixeira J 2021. Remote sensing and GIS applications in earth and environmental systems sciences. *SN Applied Sciences* 3:870 doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04855-3>
- Cohen J 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement* 20:37-46
- Colli GR, Vieira CR, Dianese JC 2020. Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. *Biodiversity and Conservation* 29:1465-1475 doi:<https://doi.org/10.1007/s10531-020-01967-x>
- Colman CB, Guerra A, Almagro A, Roque FO, Rosa IMD, Fernandes GW, Oliveira PTS 2024. Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights the need to account for private property sizes for biodiversity conservation. *Sci Rep-Uk* 14:4559 doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-024-55207-1>
- Cordeiro LAM, Vilela L, Marchão RL, Kluthcouski J, Martha-Júnior GB 2015. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia* 32:15-43
- Costa AH 2020. *Um olhar geográfico sobre o cerrado e os perigos de sua degradação*. Pontifícia Universidade Católica de Goiás
- Developer QT 2020. QGIS Geographic Information System. QGIS-OSGeo4W-3.16.0-1-Setup-x86_64.exe. Accessed 15 de junho 2022
- Embrapa 1979. *Manual de métodos de análise de solo*. Embrapa, Rio de Janeiro
- Foli ACA, Faria KMS 2020. Oportunidades e desafios da criação de Unidades de Conservação: reflexões sobre as experiências no Estado de Goiás, Brasil. *Cerrados* 18:424-446
- Fushimi M, Lima GN, Capoane V 2024. Changes in Land Use and Cover and Their Environmental Impacts in the Cerrado of Mato Grosso Do Sul, Brazil. *Sustainability* 16. doi:<https://doi.org/10.3390/su16104266>
- Gabriel AW, Silva ESN, Sartori MF, Schmidt IB, Sampaio AB 2022. Semeadura Direta para Restaurar Savanas Neotropicais: uma Alternativa para Adequação Ambiental no Cerrado. *Biodiversidade Brasileira-BioBrasil* 12:88-103
- Gallo P, Albrecht E 2019. Brazil and the Paris Agreement: REDD+ as an instrument of Brazil's Nationally Determined Contribution compliance. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* 19:123-144 doi:<https://doi.org/10.1007/s10784-018-9426-9>



Goiás 2021. Decreto N° 9.872, de 26 de maio de 2021. <https://legisla.casacivil.go.gov.br/api/v2/pesquisa/legislacoes/103989/pdf>. Accessed 25 de maio 2022

Gomes VP, Araújo MSB, Galvínio JD 2021. Mudanças espaço-temporais no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica dorio Pontal a partir de dados referenciais do Google Earth Pro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14:4148-4160

Guimarães AK, Telesi Pacheco Conceição J, Bau Dalmas F, Magera Conceicao M 2024. Aplicação da Lei nº 12.651/2012 na análise da ocupação das áreas de preservação permanente da bacia hidrográfica cachoeirinha invernada, Guarulhos (SP). *Revista Científica Acertte* 4:e45184 doi:<https://doi.org/10.63026/acertte.v4i5.184>

Herrmann PB, Nascimento VF, Freitas MWD 2022. Sensoriamento Remoto Aplicado à Análise de Fogo em Formações Campestres: Uma Revisão Sistemática. *Revista Brasileira de Cartografia* 74:437-458 doi:<https://doi.org/10.14393/rbcv74n2-63739>

Hofmann GA-O et al. 2021. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. *Glob Change Biol*:4060-4073 doi:[10.1111/gcb.15712](https://doi.org/10.1111/gcb.15712)

IBGE 2013. *Manual técnico de Uso da Terra*. vol 3. 3 edn. Rio de Janeiro,

Ilyas M et al. 2021. Drought Tolerance Strategies in Plants: A Mechanistic Approach. *Journal of Plant Growth Regulation* 40:926-944 doi:<https://doi.org/10.1007/s00344-020-10174-5>

Kapoor D, Bhardwaj S, Landi M, Sharma A, Ramakrishnan M, Sharma A 2020. The Impact of Drought in Plant Metabolism: How to Exploit Tolerance Mechanisms to Increase Crop Production. *Applied Sciences* 10:5692. doi:<https://doi.org/10.3390/app10165692>

Karimi F, Sultana S 2024. Urban Expansion Prediction and Land Use/Land Cover Change Modeling for Sustainable Urban Development. *Sustainability* 16:2285. doi:<https://doi.org/10.3390/su16062285>

Klink CA, Sato MN, Cordeiro GG, Ramos MIM 2020. The Role of Vegetation on the Dynamics of Water and Fire in the Cerrado Ecosystems: Implications for Management and Conservation. *Plants* 9:1803. doi:<https://doi.org/10.3390/plants9121803>

Landau EC, Guimarães DP, Reis RJ 2013. *Mapeamento das áreas irrigadas por pivôs centrais no Estado de Goiás e no Distrito Federal - Brasil*. vol Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 77. Sete Lagoas, MG, Embrapa Milho e Sorgo

Liesenberg V, Ponzoni FJ, Galvão LS 2007. Análise da dinâmica sazonal e separabilidade espectral de algumas fitofisionomias do Cerrado com índices de vegetação dos sensores MODIS/TERRA e AQUA. *Revista Árvore* 31:295-305

Lima AFL, Campos MCC, Enck BF, Silva-Simões W, Araújo RM, Santos LAC, Cunha JM 2021. Physical soil attributes in areas under forest/pasture conversion in northern Rondônia, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* 194:34 doi:[10.1007/s10661-021-09682-y](https://doi.org/10.1007/s10661-021-09682-y)



Lima FS, Almeida NV 2017. Dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental (APA) do Cariri, Paraíba-PB, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 10:699-721

Luiz CH, Steinke VA 2022. Recent Environmental Legislation in Brazil and the Impact on Cerrado Deforestation Rates. *Sustainability* 14:8096. doi:<https://doi.org/10.3390/su14138096>

Majumdar A, Avishek K 2023. Riparian Zone Assessment and Management: an Integrated Review Using Geospatial Technology. *Water, Air, & Soil Pollution* 234:319 doi:<https://doi.org/10.1007/s11270-023-06329-1>

Marcuzzo FFN, Cardoso MRD, Faria TG 2012. Chuvas no cerrado da região centro-oeste do Brasil: análise histórica e tendência futura. *Ateliê Geográfico* 6:112-130

Margulis S 2003. *Causas do desmatamento da Amazônia brasileira*. 1 edn. Banco Mundial, Brasília

Marques EQ, Marimon-Junior BH, Marimon BS, Matricardi EAT, Mews HA, Colli GR 2020. Redefining the Cerrado–Amazonia transition: implications for conservation. *Biodiversity and Conservation* 29:1501-1517 doi:<https://doi.org/10.1007/s10531-019-01720-z>

Nextgis 2018. Air Ais Survey: MOLUSCE Modules for Land Use Change Evaluation NEXTGIS. <http://QGIS-OSGeo4W-2.18.23-1-Setup-x86.exe> .

Robinson JG et al. 2024. Scaling up area-based conservation to implement the Global Biodiversity Framework's 30x30 target: The role of Nature's Strongholds. *Plos Biol* 22:e3002613 doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002613>

Rodrigues MA 2013. Áreas consolidadas no Código Florestal (Lei 12.651/2012): uma vergonha sem precedentes no Direito Ambiental brasileiro. *Revista de Direito Ambiental N* 69:345-356

Rosa LE, Cherem LFS, Siame L 2023. The role of natural and anthropic factors in the variability of soil loss in the state of Goiás between 1985 and 2018. *Sociedade & Natureza* 35:e66034 doi:<https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-66034x>

Rosembach R, Ferreira NJ, Shimabukuro YE, Conforte JC 2010. Análise da dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil a partir de dados MODIS-TERRA. *Revista Brasileira de Cartografia* 2:401-416

Santos D, Amorim C, Silva MJ, Buriel MT 2022. A new species of *Evolvulus* (Convolvulaceae): A rare and threatened species from the Brazilian Cerrado, a Neotropical biodiversity hotspot. *Systematic Botany* 47:1094-1099 doi:<https://doi.org/10.1600/036364422X16674053033868>

Silva LC et al. 2021. Índices biofísicos e o saldo de radiação à superfície via sensoriamento remoto no Semiárido Pernambucano. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 06:012-023

Soares AK et al. 2020. *Planos de recursos hídricos das unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos do estado de Goiás afluentes ao rio Paranaíba: plano de ação da UPGRH do rio meia ponte*. vol 1 Secretaria de Meio Ambiente de Goiás, Goiânia -GO



Souza CM et al. 2020. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing* 12:2735. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12172735>

Souza SBSe, Cruvinel KAdS, Formiga KTM 2024. Water Quality Index by Multivariate Statistical Technique to Estimate the Temporal Decay of the Watercourses. *Revista de Gestão Social e Ambiental* 18:e08126 doi:<https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-152>

Tian Y, Duan M, Cui X, Zhao Q, Tian S, Lin Y, Wang W 2023. Advancing application of satellite remote sensing technologies for linking atmospheric and built environment to health. *Frontiers in Public Health* 11 doi:<https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1270033>

UICN, WWF-Brasil, IPÊ 2011. *Metas de Aichi: Situação atual no Brasil* vol 1 União Internacional para Conservação da Natureza, World Wide Fund For Nature - Brasil, Ipê, Nave Terra

Yirigui Y, Lee S-W, Nejadhashemi AP, Herman MR, Lee J-W 2019. Relationships between Riparian Forest Fragmentation and Biological Indicators of Streams. *Sustainability* 11:2870. doi:<https://doi.org/10.3390/su11102870>