

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE FRAGMENTOS FLORESTAIS DE CERRADO DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JOÃO LEITE – GOIÁS****ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF CERRADO FOREST FRAGMENTS OF THE
JOÃO LEITE RIVER WATERSHED – STATE OF GOIÁS**

Thallys Orestes SOUSA FILHO¹
Fernando MENDONÇA FILHO²
José Carlos de SOUZA³

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar as condições biofísicas e ecológicas dos fragmentos de Cerrado, da bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite em Goiás, por meio dos índices de vegetação e métricas de paisagem. Os índices de vegetação foram gerados na plataforma Google Earth Engine e os fragmentos de Cerrado compilados da base *raster* do Projeto Mapbiomas do ano de 2022. As métricas de paisagem geradas foram efeito de borda, índice de exposição antrópica e dimensão fractal. Os resultados do NDVI indicaram boa produção fotossintética e vigor vegetativo para todas as classes de fragmentos. Quanto ao NDWI, os melhores valores foram registrados em fragmentos pequenos que margeiam cursos da água, indicando a influência dos sistemas de drenagens na disponibilidade de água para a vegetação. Os dois índices apresentaram valores reduzidos na borda dos fragmentos, indicando efeito de borda provocado pelas atividades antrópicas. Quanto às métricas de paisagem, todos os índices aplicados indicaram a predominância das classes moderada a alta, revelando que os fragmentos estão em condições de vulnerabilidade ecológica e ambiental. Isso em função do grande número de fragmentos pequenos e médios, com formatos irregulares, área-núcleo muito próxima às bordas e intensa atividade agropecuária no entorno.

Palavras-chave: Paisagem fragmentada; Índice de vegetação; Métricas de paisagem.

Abstract: This work aimed to evaluate the biophysical and ecological conditions of the *Cerrado* fragments of the *Ribeirão João Leite* Hydrographic Basin, in the state of Goiás, through vegetation indices and landscape metrics. The vegetation indices were generated on the Google Earth Engine platform and the fragments of *Cerrados* were compiled from the Raster base of the Mapbiomas Project, year 2022. The generated landscape metrics were the edge effect, the anthropic exposure index, and fractal dimension. The NDVI results showed high photosynthetic activity and vegetative vigor across all fragment classes. Concerning the NDWI, the best values were recorded for small fragments that border watercourses, indicating the influence of drainage systems on water availability for vegetation. The two indices showed reduced values at the edge of the fragments, suggesting an edge effect caused by anthropogenic activities. Finally, about the landscape metrics, all applied indices indicated the predominance of the moderate to high classes, indicating that the fragments are in conditions of ecological and environmental vulnerability. This is probably the result of the large number of small and medium-sized fragments, with irregular shapes, a core area very close to the edges, and the intense agricultural activity in the surroundings.

Keywords: Fragmented landscape; Vegetation index; Landscape metrics.

¹ Graduando em Geografia pela Universidade Estadual de Goiás - Unidade Universitária de Anápolis - CSEH - Nelson de Abreu Júnior. thallys.filho@aluno.ueg.br.

² Graduando em Geografia pela Universidade Estadual de Goiás - Unidade Universitária de Anápolis - CSEH - Nelson de Abreu Júnior. fernando.765@aluno.ueg.br.

³ Geógrafo, doutor em Ciências Ambientais (ICT-Unesp) e professor da Universidade Estadual de Goiás - Unidade Universitária de Anápolis - CSEH - Nelson de Abreu Júnior. jose.souza@ueg.br.

Introdução

O Cerrado brasileiro tem enfrentado intenso processo de conversão de áreas naturais em antrópicas, impulsionado pelas atividades agropecuárias. Estudos têm indicado que mais de 50% das coberturas naturais desse domínio já foram convertidos em pastagens plantadas ou áreas agrícolas, produzindo paisagens altamente fragmentadas (KLINK; MACHADO, 2005; SOUZA; MARTINS; DRUCIAKI, 2020). A avaliação e o monitoramento de paisagens fragmentadas, como as do domínio do Cerrado, têm-se tornado um dos principais enfoques no âmbito da conservação de ecossistemas e da biodiversidade.

São múltiplas as abordagens de análise ambiental e territorial que podem contribuir para a gestão e o manejo de ambientes que apresentam alta fragmentação da paisagem, com vistas à conservação dos recursos naturais, processos ecológicos e aumento da qualidade ambiental. Estudos nesse segmento têm apresentado a importância desse monitoramento, considerando o elevado impacto da vegetação na conservação da biodiversidade, nos processos físico-químicos e ecológicos, na conservação dos corpos hídricos, no comportamento do ciclo do carbono, nas mudanças climáticas, entre outros aspectos (CASTANHEIRA; LANDIM; LOURENÇO, 2014; KENNEL; HUBBART; IKEM, 2015).

As técnicas de sensoriamento remoto têm contribuído substancialmente na análise das paisagens, em especial dos fragmentos de vegetação. Dentre essas técnicas, destaca-se, aqui, a aplicação dos índices de vegetação, que se fundamentam nos valores de refletância ou radiância apresentados pela vegetação, nas regiões espectrais do visível e do infravermelho. Por meio desses índices é possível mensurar a biomassa fotossinteticamente ativa, o vigor e a saúde das plantas, a presença de água na folhagem, estresse hídrico, entre outros (JENSEN, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Para os parâmetros citados, os índices de Vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e NDWI (*Normalized Difference Water Index*) estão entre os mais utilizados.

Outras técnicas aplicadas à análise da fragmentação de paisagens são as métricas de paisagem, que são técnicas de análise das condições ambientais dos fragmentos de vegetação, e representam uma abordagem vinculada às concepções metodológicas da ecologia de paisagens. A ecologia de paisagem é uma proposta teórico-metodológica de estudo ambiental do território que assume em suas concepções a análise multidisciplinar e integrada, a partir das categorias estrutura, função e mudança (METZGER et al., 2007; LANG; BLASCHKE, 2009).

As métricas são modelos matemáticos capazes de quantificar as características espaciais das manchas (fragmentos) e que contribuem para a avaliação das condições ecológicas e ambientais dos fragmentos de vegetação e sua condição em relação à matriz circundante (WU; HOBBS, 2007; LANG; BLASCHKE, 2009; SOUSA, 2021). Dentre os indicadores de métricas de paisagem, há o índice de efeito de borda, o índice de exposição antrópica e a dimensão fractal. Esses parâmetros avaliam as condições ambientais e ecológicas dos fragmentos correlacionando as variáveis: área, perímetro, forma e usos da terra no entorno (TURNER et al., 1990; RIBEIRO et al., 2009; LANG; BLASCHKE, 2009).

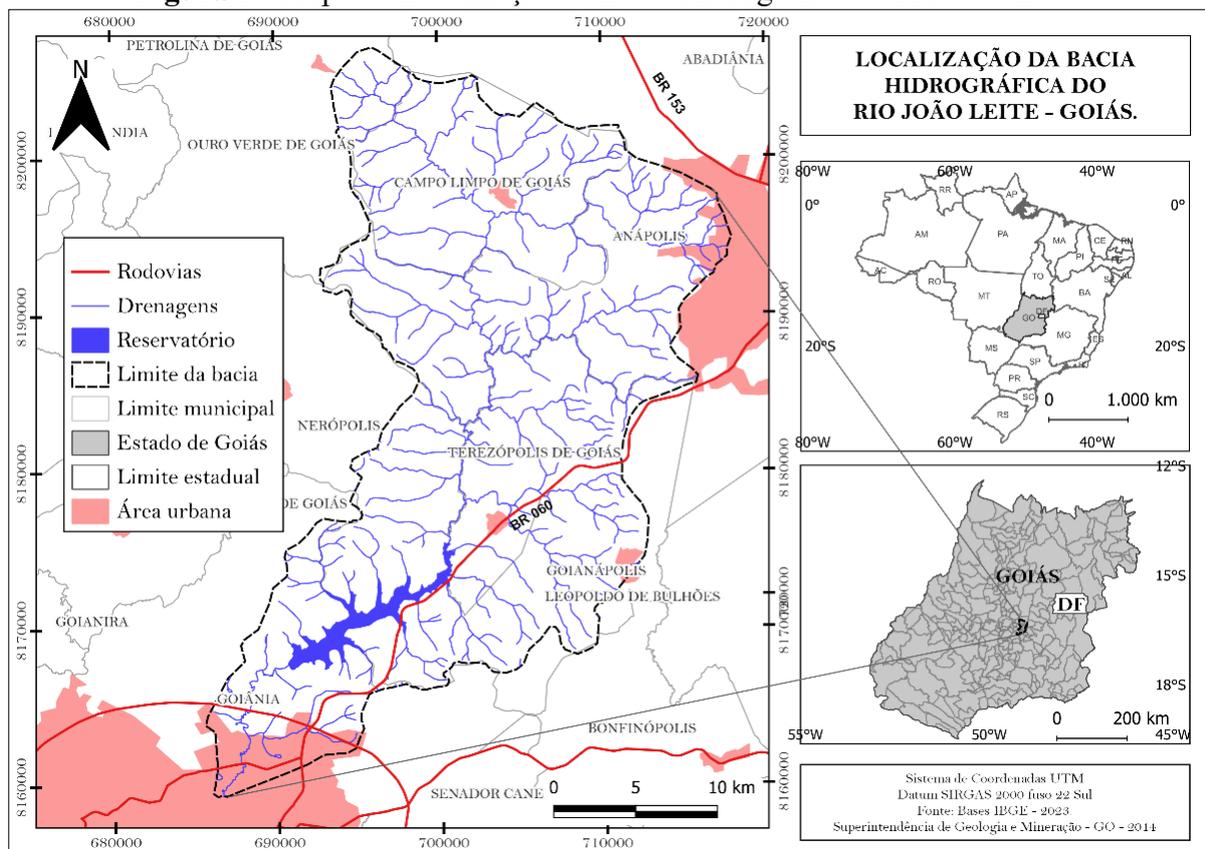
A avaliação e o monitoramento dos fragmentos de vegetação têm se tornado um dos principais enfoques no âmbito da conservação ambiental. Estudos nesse segmento têm destacado a importância desse monitoramento, dado o impacto significativo da vegetação na conservação da biodiversidade, nos processos físico-químicos e ecológicos, na proteção dos corpos hídricos, no ciclo do carbono e nas mudanças climáticas, entre outros aspectos relevantes (CASTANHEIRA; LANDIM; LOURENÇO, 2014; KENNEL, HUBBART; IKEM, 2015).

Assim, este artigo teve como objetivo avaliar as condições biofísicas e ecológicas dos fragmentos de Cerrado da bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite, no estado de Goiás, por meio dos índices de vegetação e métricas de paisagem.

Materiais e Métodos

O recorte espacial de aplicação da proposta foi a bacia hidrográfica do Rio João Leite, localizada na porção central do estado de Goiás, entre as latitudes 16° 13' e 16° 39' sul e longitudes 48° 57' e 49° 11' oeste. Ocupa uma área aproximada de 764,85 km², cujo território é composto pelos municípios de Goiânia, Anápolis, Terezópolis, Goianápolis, Nerópolis e Ouro Verde (Figura 1). A bacia é a principal responsável pelo abastecimento urbano da região metropolitana de Goiânia e múltiplos usos da água e da terra ocorrem em seu território. A área da bacia interliga, no sentido montante-foz, as duas maiores malhas urbanas do estado de Goiás, Anápolis e Goiânia, onde as paisagens encontram-se altamente fragmentadas.

Figura 1 - Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio João Leite.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os índices NDVI e NDWI foram calculados a partir de imagens do sensor Landsat 8 do imageador OLI (Operacional Land Imager) na Plataforma do Google Earth Engine (GEE), considerando as imagens disponíveis para o ano de 2022, em que se gerou uma imagem índice da mediana dos valores. O GEE é uma plataforma de processamento de imagens em nuvem, na qual as imagens Landsat já apresentam correção geométrica, radiométrica e atmosférica. Nos cálculos foram utilizadas as equações propostas por Gao, (1996) e Rouse et al. (1973):

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Em que: NIR = refletância na faixa do infravermelho próximo; R = refletância na faixa do vermelho; SWIR= refletância na faixa do infravermelho médio.

O mapa de uso e cobertura da terra foi extraído das bases *raster* do projeto Mapbiomas, coleção 8 de 2022. Para o tratamento das bases foi utilizado o software QGIS versão 3.22. A partir desse mapa, extraíram-se fragmentos de Cerrado que foram convertidos para o formato vetorial e classificados por tamanho, segundo a metodologia de Pirovani et al. (2014),

considerando as seguintes classes: pequeno (≥ 5 a 10 ha), médio (>10 a 50 ha), grande (>50 a 100 ha) e muito grande (>100 ha).

Após a classificação dos fragmentos por tamanho, foram calculados o perímetro, o Índice de Circularidade (IC), o Índice de Efeito de Borda (IEB), o Índice de Exposição Antrópica (IEA) e a Dimensão Fractal (DF). Para esses procedimentos, foi utilizado o plugin LecoS - Landscape Ecology Statistics no software de geoprocessamento QGIS.

O valor de IC varia de zero 0 a 1, sendo que valores próximos a 1 são formas mais arredondadas; e próximos a 0, mais alongadas (irregular). Os valores mais próximos a 1 indicam fragmentos mais protegidos em relação ao efeito de borda (NASCIMENTO et al., 2006; PIROVANI et al., 2014). O IC é obtido pela seguinte equação:

$$IC = \frac{(2\sqrt{\pi A})}{P}$$

IC = Índice de circularidade; A = Área do fragmento florestal; P = Perímetro do fragmento florestal.

O IEB é um indicador de vulnerabilidade do fragmento às interferências antrópicas (LOURENÇO; SILVA; SALES, 2014). Os valores do IEB variam de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1, maior a pressão antrópica e menor as condições de manutenção e conservação do fragmento (LOURENÇO; SILVA; SALES, 2014). A faixa de entorno (*buffer*) utilizada foi de 100 metros, considerando que a influência da matriz circundante pode chegar com mais intensidade até esta metragem (REIS; NISHYAMA, 2017). Na Tabela 1 estão dispostos os pesos atribuídos aos usos da terra utilizados no cálculo.

$$IEB = \sum_{i=1}^n \frac{U_i \times A_i}{A}$$

IEB = Índice de efeito de borda; U_i = Peso atribuído ao tipo de cobertura e uso da terra do entorno em uma determinada faixa (Tabela 1); A_i = Área de cada tipo de cobertura e uso da terra ao redor do fragmento; A = Área da faixa do fragmento; n = Quantidade de cobertura e uso da terra; i = Tipo de cobertura e uso da terra.

Tabela 1 - Pesos atribuídos às classes de uso e cobertura da terra.

Classe	Peso
Área urbanizada/Mineração	0,95
Lavouras temporárias/solo exposto/Mosaico de usos	0,85
Pastagem	0,70
Cultura permanente	0,58
Silvicultura	0,33

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2022)

O IEA mensura o grau de exposição antrópica do fragmento em relação aos usos da terra que se fazem em seu entorno (LOURENÇO; SILVA; SALES, 2014). O índice foi obtido por meio da equação que segue, pela qual foram consideradas as variáveis: IC e IEB. O valor desse índice varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maiores são as pressões antrópicas sobre o fragmento (LOURENÇO; SILVA; SALES, 2014; SOUSA, 2022). Na classificação do IEB e do IEA, valores menores que 0,6 foram considerados baixos; entre 0,6 e 0,8, moderados; e acima de 0,8, altos, de acordo com a proposta de Sousa (2022).

$$IEA = \frac{((1 - IC) + 2 IEB)}{3}$$

IEA = Indicador de exposição antrópica; IC = Indicador de circularidade; IEB = Indicador de efeito de borda.

A DF é uma métrica que expressa o nível de complexidade da forma do fragmento ou da mancha, sendo que valores próximos a 1 representam perímetros simples; e valores próximos a 2 indicam perímetros mais complexos (LANG; BLASCHKE, 2009). O DF foi obtido por meio da equação que segue, e, na classificação, valores iguais ou menores que 1,4 foram considerados baixos; maiores que 1,4 até 1,6, moderados; e acima de 1,6, altos.

$$DF = \frac{2 \cdot \log P}{\log A}$$

DF = Dimensão Fractal; P = perímetro; A = Área.

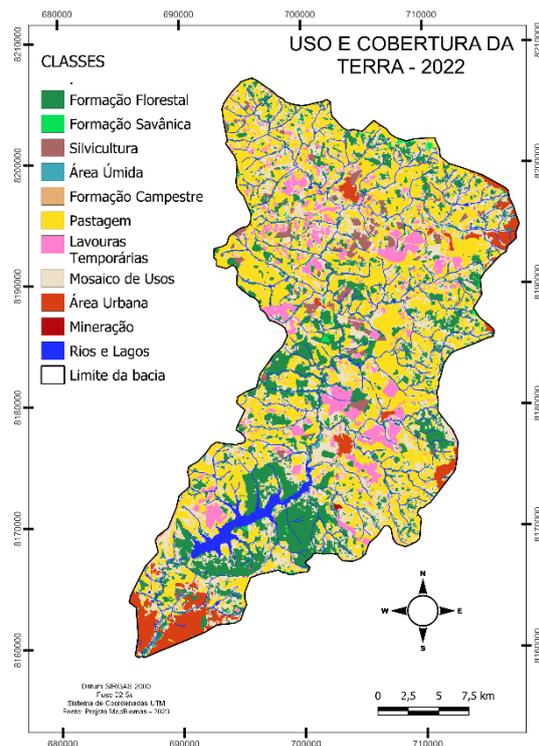
Para a definição das métricas foi utilizado o *plugin* LecoS (*Landscape Ecology Statistics*) hospedado no *software* QGIS e todas as técnicas de geoprocessamento, cálculos e elaboração dos produtos cartográficos; também foi utilizado o *software* QGIS versão 3.16.

Resultados e discussões

A partir do mapeamento de uso e cobertura da terra para o ano de 2022 (Figura 2), pudemos identificar que 21,19% da área da bacia apresentavam coberturas naturais de Cerrado, com predomínio das formações florestais, ocupando 157,64km². As pastagens plantadas e o mosaico de usos compreendiam as coberturas antrópicas predominantes na bacia, ocupando, respectivamente, 278,41km² e 203,05km². Percentualmente, essas classes representam 36,40%

e 26,55% de toda a área (Tabela 2). O plantio de soja e as áreas urbanizadas também se destacaram, ocupando 4,94% e 4,18% da área, respectivamente. As áreas urbanas são partes ou a totalidade da sede dos municípios de Goiânia, Campo Limpo de Goiás, Anápolis, Terezópolis de Goiás e Goianópolis.

Figura 2 - Uso e cobertura da terra para o ano de 2022.



Fonte: Projeto MapBiomass, coleção 8 – 2022

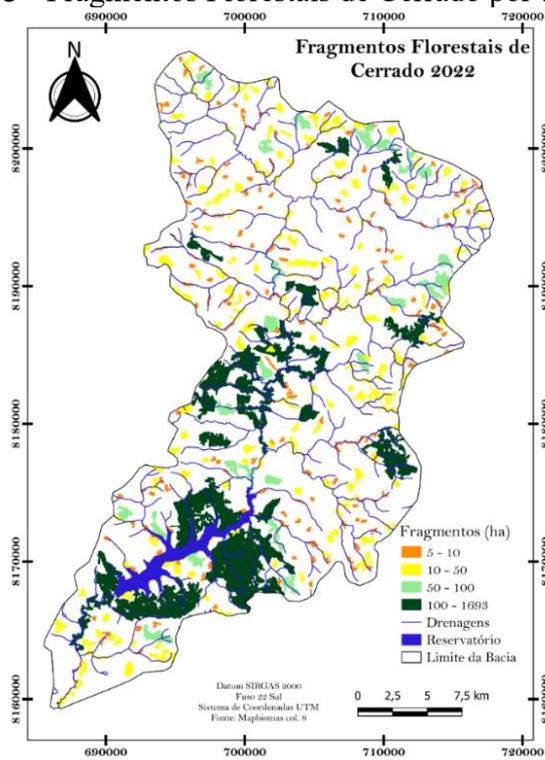
Tabela 2 - Dados quantitativos do uso e cobertura da terra na bacia (2022)

Classe	Área (km ²)	Área (%)
Formação Florestal	157,64	20,61
Formação Savânica	4	0,52
Silvicultura	18,74	2,45
Área Úmida	3,56	0,47
Formação Campestre	0,45	0,06
Pastagem	278,41	36,40
Mosaico de Usos	203,05	26,55
Área Urbana	31,95	4,18
Mineração	0,24	0,03
Rios e Lagos	13,7	1,79
Lavouras Temporárias	53,11	6,94
Total	764,85	100,00

Fonte: Organizada pelos autores.

Assim, considerando os dados apresentados na Tabela 2, aproximadamente 80% da área da bacia apresentava alteração antrópica, com significativa fragmentação da paisagem provocada principalmente pelas atividades ligadas à agropecuária. Na Figura 3 estão espacializados os fragmentos de remanescentes de Cerrado, que restaram desse processo de fragmentação e classificados por tamanho. Esses fragmentos são predominantemente de formação florestal, que, segundo Ribeiro e Walter (2008), podem ser mata ciliar, mata de galeria, mata seca e cerradão. Na Tabela 3 são apresentados os dados quantitativos desses fragmentos por classe, para a aplicação das análises. No estudo foram considerados 383 fragmentos florestais com dimensões iguais ou superiores a 5 hectares, totalizando 13702,16 hectares. Os resultados indicaram um predomínio de fragmentos médios e pequenos, com média de tamanhos variando entre 19,66 e 6,98 hectares, respectivamente.

Figura 3 - Fragmentos Florestais de Cerrado por tamanho.



Fonte: Organizado pelos autores – 2024.

Tabela 3 - Descrição quantitativa dos dados dos fragmentos.

Classe	Tamanho (ha)	Mínimo	Máximo	Média	Total de Fragmentos	Total (área em ha)
Pequeno	5 – 10	5,06	9,87	6,98	161	1122,02
Médio	> 10 – 50	10,04	48,84	19,66	183	3598,36
Grande	> 50 – 100	51,25	99,84	66,62	23	1532,33
Muito Grande	> 100	103,61	1703,81	465,59	16	7449,45
Total	-	-	-	-	383	13702,16

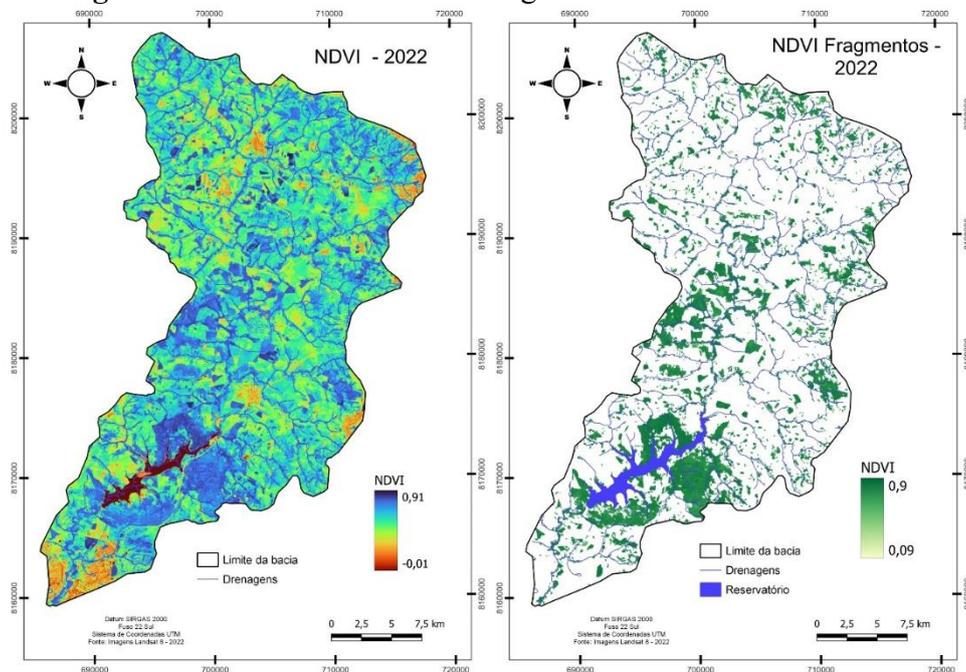
Fonte: Organizada pelos autores – 2024.

A imagem do NDVI para toda a bacia apresentou valores que variaram entre -0,04 e 0,91, com média de 0,58 (Figura 4). Os valores deste índice podem variar entre -1 a 1, sendo que quanto mais próximo a 1, maior o vigor, densidade e produção fotossintética da vegetação (ROUSE et al.,1973).

Comparando o uso e cobertura da terra com o NDVI, verifica-se que os valores negativos ou próximos a 0 compreendem as áreas urbanizadas, os corpos hídricos e as áreas de solo exposto. Os valores mais elevados de NDVI referem-se às coberturas naturais de Cerrado, que compreendem as formações florestais. As pastagens que são a cobertura antrópica

predominante na paisagem apresentaram valores relativamente altos de NDVI. No entanto, isso pode ser explicado pelo fato de a imagem ser o resultado de uma mediana das imagens Landsat 8 de todo o ano de 2022, que considera os resultados do período chuvoso e seco.

Figura 4 - NDVI da bacia e dos fragmentos florestais de Cerrado.



Fonte: Elaborado pelos autores – 2024.

Cabe ressaltar que a vegetação natural, essencialmente florestal, mesmo sob influência do período de estiagem, que na bacia ocorre de maio a setembro (INMET, 2022), são coberturas perenes e podem apresentar menor variação nos resultados de mediana do NDVI, no decorrer do ano. Entretanto, nas áreas onde ocorrem as pastagens, culturas temporárias e o mosaico de usos, em função do período de preparo da terra, incluindo a aragem do solo, associado ao período de estiagem, podem apresentar valores muito baixo ou negativos do índice.

Na Figura 4 também é apresentado o NDVI dos fragmentos florestais de Cerrado e, na Tabela 3, a seguir, estão os dados estatísticos para cada classe de fragmento. De acordo com a espacialização dos fragmentos no mapa, nota-se que os fragmentos muito grandes concentram-se próximos ao reservatório. Esses grandes fragmentos de ambos os lados do reservatório fazem parte do Parque Estadual Altamiro de Moura Pacheco, que é uma unidade de conservação de proteção integral criada em 1992, que possui aproximadamente uma área em torno de 2 mil hectares (SEMARH, 2008).

Tabela 4 - Dados estatísticos do NDVI dos fragmentos.

Classe	Valor mínimo	Valor médio	Valor máximo
Pequeno	0,09	0,76	0,89
Médio	0,10	0,76	0,88
Grande	0,33	0,77	0,90
Muito Grande	0,16	0,78	0,90

Fonte: Organizada pelos autores – 2024.

Os dados estatísticos apresentados nessa tabela, indicam que os valores médios e máximos de NDVI, dentre as classes de tamanho dos fragmentos, assinalaram uma pequena variação, porém, em relação aos valores mínimos, ocorreram diferenças significativas, oscilando entre 0,09 e 0,33. Os baixos valores de NDVI foram registrados nas bordas dos fragmentos, resultado do efeito de borda; e assim como no interior dos fragmentos grandes e muito grandes, onde ocorreram desmatamentos e que hoje estão em processo de regeneração. O efeito de borda faz parte das alterações nos parâmetros físicos, químicos e biológicos provocadas por atividades antrópicas, que ocorrem na área de contato do fragmento de vegetação com a matriz circundante (LAURENCE; YENSEM, 1991; BLUMENFELD et al., 2016).

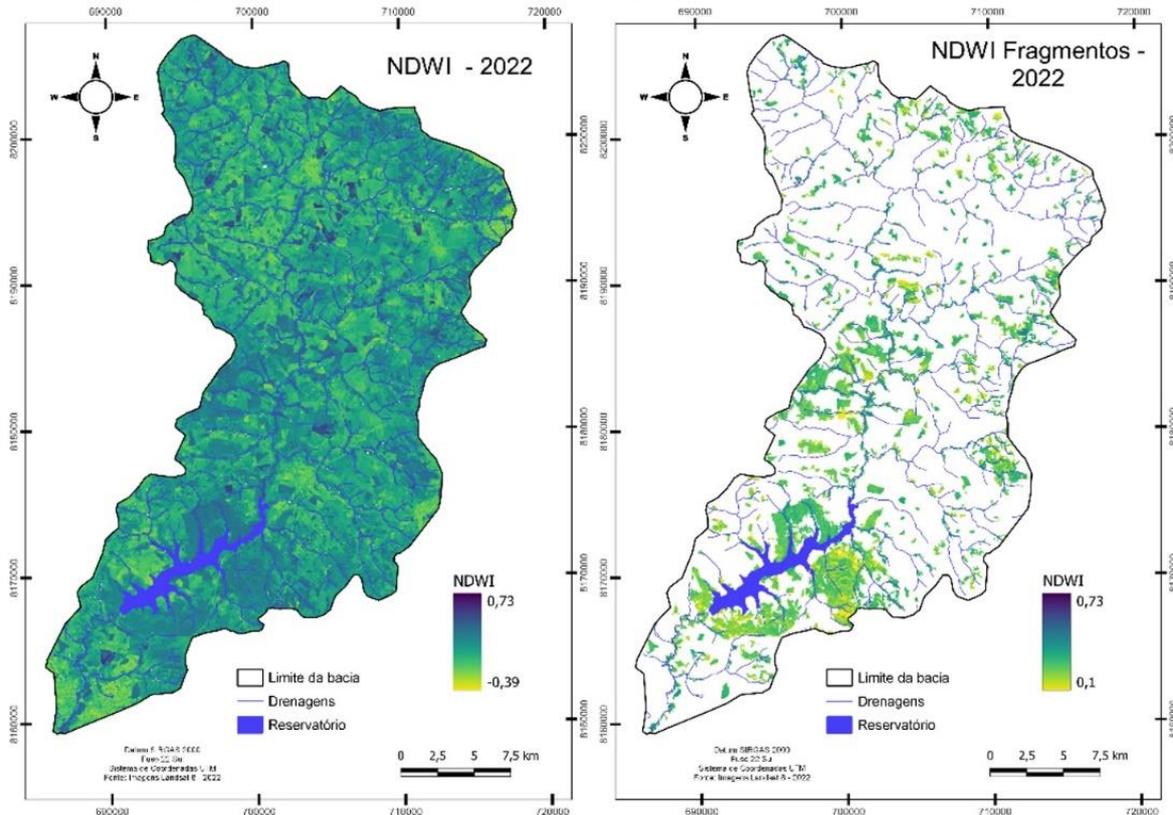
Os valores médios de NDVI dos fragmentos variaram entre 0,76 e 0,78, indicando assim boas condições de produção fotossintética e vigor vegetativo. Estudos realizados por Santos et al. (2016) encontraram valores médios de NDVI para Cerrado denso que variaram de 0,8 no período chuvoso a 0,62 no período seco (SANTOS, et al., 2016); por sua vez, Carvalho et al. (2022) encontraram valores médios do índice iguais ou superiores a 0,75 para formações florestais de Cerrado.

Nos mapas da Figura 5, observa-se a espacialização do NDWI para toda a bacia e para os fragmentos de Cerrado. Este índice mensura o conteúdo de água na folhagem, indicando níveis de equilíbrio/estresse hídrico nas plantas, seus resultados podem apresentar valores entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo a 1, maior o índice de umidade (GAO, 1996; JENSEN, 2009).

Considerando toda a bacia, o NDWI variou de -0,39 a 0,73 com média de 0,05. Os valores negativos de umidade estão relacionados a área sem cobertura vegetal. As pastagens, que são a cobertura antrópica predominante, registraram valores entre 0,01 a 0,09 de mediana para o período. Os maiores valores de NDWI, como esperado, ocorreram nas áreas de mata de galeria e nas matas ciliares que, em função de estarem próximas às drenagens, registraram índices mais altos de umidade no decorrer do ano de 2022. As áreas de silvicultura, que na bacia

são representadas por áreas de cultivo de eucalipto, também registraram valores mais elevados do índice.

Figura 5 - NDWI da bacia e dos fragmentos florestais de Cerrado.



Fonte: Elaborado pelos autores – 2024.

Na Tabela 5 estão os dados quantitativos do NDWI dos fragmentos florestais. Percebe-se que, em relação aos valores médios, não houve variação significativa, registrando valores entre 0,25 para fragmentos muito grandes e 0,26 para os demais. Quanto aos valores mínimos, as melhores condições de umidade foram encontradas nos fragmentos médios e muito grandes e isto pode estar relacionado ao tamanho do fragmento e/ou sua forma geométrica, que favorece a concentração e manutenção da umidade (LOURENÇO; SILVA; SALES, 2014; SOUSA, 2022).

Tabela 5 - Dados quantitativos do NDWI para dos fragmentos

Classe	Média	Valor Mínimo	Valor Máximo
Pequeno	0,26	0,15	0,73
Médio	0,26	0,26	0,57
Grande	0,26	0,10	0,55
Muito Grande	0,25	0,22	0,54

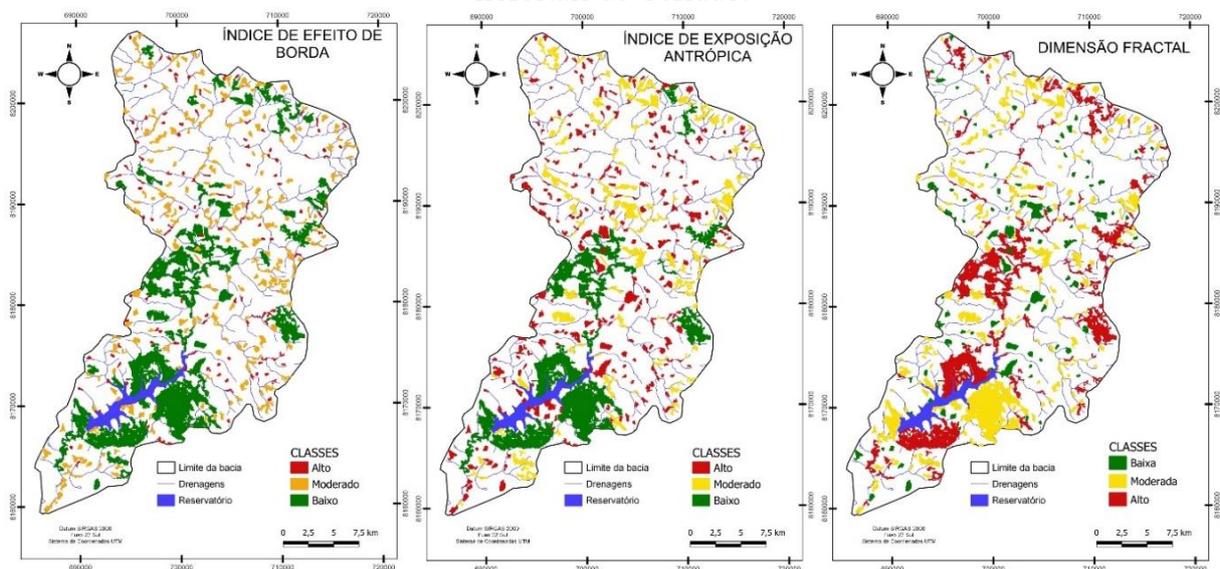
Fonte: Organizada pelos autores

Quanto aos valores máximos, os fragmentos pequenos apresentaram os maiores valores de NDWI, o que pode ser explicado pelo fato de muitos deles serem matas ciliares ou de galeria que margeiam cursos d'água. Apesar de serem pequenos, esses fragmentos podem ser favorecidos pela disponibilidade de água ao longo do ano, o que influencia na presença de umidade na folhagem. Os fragmentos, por se estenderem para os interflúvios, acabam sendo afetados pela sazonalidade das chuvas que é marcante no domínio do Cerrado. Assim como o NDVI, o NDWI também apresenta importante redução dos valores nas bordas dos fragmentos, independentemente do tamanho, como consequência do efeito de borda.

Resultados semelhantes foram encontrados por Souza, Herculano e Sousa (2023) na bacia hidrográfica do Rio Vermelho, em Goiás, onde os valores mais altos de NDWI foram registrados em formações florestais densas de Cerrado, localizadas às margens ou próximas a cursos d'água, corroborando os achados desta pesquisa.

Na Figura 6 estão espacializados, por classe, os índices de efeito de borda, exposição antrópica e dimensão fractal. Na Tabela 6, os dados quantitativos de cada índice.

Figura 6 - Índices de efeito de borda e exposição antrópica e dimensão fractal dos fragmentos florestais de Cerrado.



Fonte: Organizado pelos autores - 2024.

Tabela 6 - Dados quantitativos dos índices por classe e tamanho.

Efeito de borda	Tamanho dos fragmentos				
	Pequeno	Médio	Grande	Muito Grande	Total
Baixo	-	-	23	16	39
Moderado	40	183	-	-	223
Alto	121	-	-	-	121
Total					383
IEA	Tamanho dos fragmentos				
	Pequeno	Médio	Grande	Muito Grande	Total
Baixo	-	1	2	9	12
Moderado	27	72	15	5	119
Alto	134	110	6	2	252
Total					383
Dimensão fractal	Tamanho dos fragmentos				
	Pequeno	Médio	Grande	Muito Grande	Total
Baixo	40	45	4	3	92
Moderado	86	87	8	6	187
Alto	35	51	11	7	104
Total					383

Fonte: Organizada pelos autores - 2024.

O efeito de borda refere-se ao grau de influência das atividades antrópicas observadas na área de contato do fragmento de vegetação com a matriz circundante (REIS; NISHYAMA, 2017; SANTOS et al., 2017). Quanto maior for a proximidade das bordas do fragmento com sua área central, mais vulnerável estará o fragmento às perturbações/alterações biofísicas e ecológicas. Essas condições têm como consequência a redução e/ou extinção de *habitats* e da biodiversidade (BLUMENFELD et al., 2016; FERNANDES; FERNANDES, 2017).

Os resultados indicaram que os fragmentos grandes e muito grandes, que ultrapassaram 50 hectares de área, apresentaram baixo efeito de borda. No entanto 344 fragmentos de tamanhos médio e pequeno, com áreas menores que 50 hectares, apresentaram efeito de borda de moderado a alto, com valores de IEB acima de 0,6 – o que está relacionado à grande quantidade de fragmentos com formatos mais circulares e com áreas entre 5 e 10 hectares e fragmentos maiores, com formas alongadas e estreitas, margeando as drenagens.

O índice de Exposição Antrópica (IEA) tem como finalidade mensurar o nível de pressão antrópica sobre os fragmentos de vegetação natural. Nesta modelagem, considerou-se o efeito de borda; o índice de circularidade, que é uma métrica que associa a forma com o tamanho da mancha, tendo como parâmetros ideais os formatos circulares e as formas de uso da terra do entorno do fragmento (LOURENÇO; SILVA; SALES, 2014; LOPES et al., 2020; SOUZA; SILVA; ALVES JUNIOR, 2023).

Como pode ser observado na Tabela 1, os fragmentos florestais de Cerrado ocupam

somente 20,61% área da bacia, indicando uma alta fragmentação da paisagem. Essa fragmentação deu-se principalmente pela introdução de pastagens e atividades agrícolas, de forma especial, culturas temporárias, atividades estas que impõem uma significativa pressão sobre fragmentos naturais. Os resultados indicaram que somente 12 fragmentos apresentaram baixo IEA, enquanto as exposições moderadas e altas totalizaram 119 e 252 fragmentos, respectivamente. Este cenário está diretamente relacionado ao padrão de uso e à ocupação da terra na bacia, que impuseram uma intensa pressão nas áreas naturais, resultando em fragmentos predominantemente médios a pequenos. Esses fragmentos têm contato direto com lavouras temporárias, que na bacia são predominantemente cultivadas com sistemas de rotação, incluindo duas safras de soja, milho ou sorgo, além de pastagens degradadas e sem manejo adequado.

A dimensão fractal (DF) de fragmentos ou manchas indicou o quão complexo ou irregular é o desenho do fragmento, numa correlação perímetro-área (SOARES FILHO, 1998), e assinalou o grau de perturbação da paisagem provocada por ações humanas (O'NEILL et al., 1988). Nesse sentido, quanto maior o valor da DF, mais vulnerável encontrava-se o fragmento em função de apresentar formas geométricas mais complexas e maior exposição das áreas-núcleo dos fragmentos aos efeitos de borda, desse modo, indicando áreas com intensa fragmentação da paisagem (O'NEILL et al., 1988; LANG; BLASCHKE, 2009).

Os valores da DF variaram de 1 a 2, indicando que quanto mais próximo de 2, maior a complexidade das formas do fragmento (LANG & BLASCHKE, 2009). A classe de baixa DF compreendeu 92 fragmentos, caracterizados por formas geométricas simples e condições ecológicas mais favoráveis, pois fragmentos com contornos simples tendem a ter áreas centrais mais protegidas dos efeitos de borda e menor exposição antrópica. Já os fragmentos com dimensão fractal moderada (valores próximos a 1,5) totalizaram 187, sendo a maioria (173) classificados como pequenos e médios, apresentando formatos moderadamente complexos.

Foram identificados 104 fragmentos na bacia com alta DF, apresentando valores iguais ou superiores a 1,6. Esses fragmentos caracterizavam-se por formas complexas e perímetros sinuosos, frequentemente associados a grandes e muito grandes fragmentos com atividades agrícolas e/ou pastoris em seu interior. De acordo com Santos e Rocha (2020), valores elevados de DF indicam formas irregulares, tornando os fragmentos ecologicamente vulneráveis à perda de biodiversidade devido ao aumento do efeito de borda e exposição às perturbações antrópicas do entorno.

Considerações finais

Os resultados do NDVI registraram boas condições de produção fotossintética e vigor vegetativo, independentemente do tamanho do fragmento. Em relação ao NDWI, os melhores resultados foram encontrados nos fragmentos pequenos que margeavam os cursos d'água, indicando forte influência da drenagem para a manutenção da umidade na folhagem. Os dois índices apresentaram valores reduzidos na borda dos fragmentos, sugerindo efeito de borda relacionado às formas de uso da terra que se dá nas bordas dos fragmentos.

O grande número de fragmentos pequenos e médios encontrados na bacia, com formatos irregulares, área-núcleo muito próxima às bordas, e a intensa atividade agropecuária no entorno influenciaram nos resultados das métricas de paisagem. Todos os índices aplicados, efeito de borda, exposição antrópica e dimensão fractal, indicaram a predominância das classes moderada a alta, apontando que os fragmentos encontravam-se em condições de vulnerabilidades ecológica e ambiental, necessitando de ações que assegurem a preservação desses ambientes e a definição de áreas prioritárias para conservação.

Os índices de vegetação e métricas de paisagem podem ser instrumentos importantes para avaliar as condições ambientais de fragmentos de vegetação natural, em especial, nos ambientes com paisagens altamente fragmentadas como o Cerrado goiano. No estado de Goiás, o Cerrado vem enfrentando, nas últimas décadas, intensos processos de fragmentação de suas paisagens, com perdas significativas de *habitats* e biodiversidade. Por isso é importante que estudos vinculados à geoecologia de paisagens, com utilização de técnicas de sensoriamento remoto, possam contribuir para as análises e a avaliação das condições ambientais desses fragmentos, com vistas à avaliação dos impactos causados pelas conversões e à definição de áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade.

Agradecimentos

Ao CNPq e a Universidade Estadual de Goiás pela concessão de bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) ao primeiro autor.

Referências

BLUMENFELD, E. C. et al. Relações entre tipo de vizinhança e efeitos de borda em Fragmento Florestal. *Ciência Florestal*, v. 26, n. 4, p. 1301-1316, 2016.

CASTANHEIRA, L. B.; LANDIM, P. M. B.; LOURENÇO, R. W. Variabilidade do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em áreas de reflorestamento: Floresta Estadual 'Edmundo Navarro de Andrade' (FEENA)/Rio Claro (SP). São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 33, n. 3, p.449-456, 2014.

GAO, B. NDWI- a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266, 1996.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil (1991-2020), Brasília-DF, 2022.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução da 2ª ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coord) [et al.]; São José dos Campos: Parêntese. 2009.

KENNEL, E.; HUBBART, J. A.; IKEM, A. A comparison of forest and agricultural shallow groundwater chemical status a century after land use change. *Science of the Total Environment*, v. 529, p. 82–90, 2015.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro, *Megadiversidade*, v. 1, n. 1, julho, p. 147-155, 2005.

LANG, S; BLASCHKE, T. *Análise da Paisagem com SIG*. São Paulo: Oficina de textos, 2009.

LAURENCE, W. F.; YENSEM, E. Predicting the impacts of edge effects in fragmented habitats. *Biological Conservation*, v. 55, p. 77-92, 1991.

LOURENÇO, R. W.; SILVA, D. C. C.; SALES, J. C. A. Development of a methodology for evaluation of the remaining forest fragments as a management tool and environmental planning. *Ambiência*, v.10, n.3, p. 685-698, 2014.

LOPES, E. R. N. et al. Spatial Dynamics of Atlantic Forest Fragments in a River Basin. *Floresta*, Curitiba, v. 50, n. 1, p. 1053 - 1062, 2020.

METZGER, J. P. et al. O uso de modelos em ecologia de paisagens. *Revista Megadiversidade*. v. 3, n. 1-2, p. 64-73, 2007.

NASCIMENTO, M. C.; et al., Mapeamento dos fragmentos de vegetação florestal nativa da Bacia hidrográfica do rio Alegre, Espírito Santo, a partir de imagens do Satélite IKONOS II. *Revista Árvore*, v.30, n.3, p.389-398, 2006.

O'NEILL R. V. et al. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, v. 1, p. 153–162. 1988.

PIROVANI, D. B. et al. Análise Espacial de Fragmentos Florestais na Bacia do Rio Itapemirim, ES. *Revista Árvore*, v.38, n.2, p.271-281, 2014.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. Sensoriamento Remoto da Vegetação. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

REIS, L. N. G.; NISHYAMA, L. A estrutura espacial dos fragmentos de vegetação nativa da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari em Minas Gerais. *GEOSUL*, v. 32, n. 65, p. 30-48, 2017.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. *CERRADO: Ecologia e Flora*. v. 1. Brasília: EMBRAPA, 2008.

RIBEIRO, M. C.; et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*. *Biological Conservation*, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERT. In: *NASA Earth Resources Technology Satellite, I Symposium Proceedings*. Washington, NASA. p. 309-317, 1973.

SANTOS, J. F. C. et al. Fragmentação florestal na Mata Atlântica: o caso do município de Paraíba do Sul, RJ, Brasil. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 15, n.3, p. 151-158, 2017.

SANTOS, C. R.; ROCHA, P. C. análise da fragmentação da paisagem na Região Extremo Oeste Paulista, Brasil. *Geosul*, Florianópolis, v. 35, n. 75, p. 325-349, mai./ago. 2020.

SEMARH. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Goiás. Plano de Manejo do Parque Estadual Altamiro de Moura Pacheco. SEMARH / ITCO. Goiânia, 2008.

SOARES FILHO, B. S. S. Análise de paisagem: fragmentação e mudanças. Departamento de Cartografia, Centro de Sensoriamento Remoto. Instituto de Geociências, UFMG. 1998.

SOUSA, J. A. P. Elaboração de um índice de vulnerabilidade ambiental dos fragmentos florestais da Mata Atlântica. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Sorocaba – São Paulo, 2021.

SOUSA, J. A. P. *et al.* Proposta de um Indicador de Sustentabilidade para Fragmentos Florestais (ISFF) por Meio de Modelagem Ambiental. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 1, p. 250-267, mar. 2022.

SOUZA, J. C.; HERCULANO, R. M. C. S.; SOUSA, J. A. P. Modelos de análise da paisagem aplicados a bacias hidrográficas do domínio do Cerrado. In.: SOUZA, J. C.; MARTINS, A. P. T. *Análises ambientais do Cerrado*. Anápolis-GO: Editora UEG, 2023.

SOUZA, J. C.; SILVA, J. R.; ALVES JUNIOR, L. R. Avaliação da qualidade ambiental dos fragmentos de cerrado na bacia hidrográfica do rio Vermelho em Goiás. *Revista da Anpege*, v. 19 n°. 38, p. 1-20, 2023.

SOUZA, J. C.; MARTINS, P. T. A.; DRUCIAKI, V. P. Uso e cobertura do solo no Cerrado: panorama do período de 1985 a 2018. *Élisée, Rev. Geo. UEG – Goiás*, v.9, n.2, jul./dez. p. 1-15, 2020.

TAKIKAWA, B. Y. Proposta metodológica para elaboração de indicador de fragilidade florestal com o uso de geotecnologias. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, São Paulo, 2020.

TURNER, M. G. et al. Effects of changing spatial scale on analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, Amsterdam, v. 3, p. 153–162, 1990.

WU, J.; HOBBS, R. J. *Key Topics in Landscape Ecology*. UK: Cambridge University Press, 2007.

Artigo recebido em 13-11-2024

Artigo aceito para publicação em 20-08-2025