



ARTIGO ORIGINAL

Fragmentação florestal na Região de Integração do Lago de Tucuruí, Pará, Brasil

Forest fragmentation on the Region of Integration of the Lake Tucuruí, Pará, Brazil

Alexandre Leão Gonçalves^{1*}
Vanessa Maria Silva da Cruz¹
Anderson Borges Serra²

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA), Rua Itaipu, 36, 68.464-000, Tucuruí, PA, Brasil

² Universidade Federal do Pará (UFPA), Rua Coronel José Porfírio, 2515, 68.372-040, Altamira, PA, Brasil

*Autor Correspondente:

E-mail: eng.alexandregoncalves@outlook.com

PALAVRAS-CHAVE

Ecologia da paisagem
Vegetação remanescente
Biodiversidade

KEYWORDS

Landscape ecology
Remaining vegetation
Biodiversity

RESUMO: O processo de fragmentação florestal ocasiona danos severos à biodiversidade, devido ao efeito de borda que ocorre nos fragmentos. O objetivo deste estudo foi avaliar a fragmentação florestal na Região de Integração do Lago de Tucuruí, estado do Pará. Para mapear os fragmentos florestais, realizou-se uma classificação supervisionada de imagens Landsat 8 OLI/TIRS. Os fragmentos foram divididos em seis classes de tamanho: classe 1 (< 10 ha), classe 2 (≥ 10 e < 50 ha), classe 3 (≥ 50 e < 100 ha), classe 4 (≥ 100 e < 500 ha), classe 5 (≥ 500 e < 1000 ha) e classe 6 (> 1000 ha). Utilizou-se o Fragstats 4.2 para calcular métricas de área, densidade, borda, forma, área central (simulações de efeito de borda: 30 m, 60 m, 90 m, 120 m), proximidade e contágio. Contabilizou-se 10.273 fragmentos na paisagem, dos quais a maioria (4.446 ou 43,28%) pertencem à classe 1. Embora em maior número, os fragmentos das menores classes totalizam menor área de floresta remanescente. O total de bordas e a densidade de bordas não seguiram um padrão correspondente ao tamanho dos fragmentos. Os maiores fragmentos possuem a maior quantidade de área central, estando menos propensos ao efeito de borda, apesar de terem formatos mais irregulares. Constatou-se que a vegetação remanescente está com alto grau de fragmentação e isolamento dos fragmentos na paisagem. Na Região de Integração do Lago de Tucuruí, Itupiranga é o município com a vegetação que mais favorece a conservação da biodiversidade, enquanto Nova Ipixuna é o que mais demanda ações de conservação.

ABSTRACT: The forest fragmentation process leads to severe damages to biodiversity, due to the edge effect that occurs in the fragments. This study aimed to evaluate the forest fragmentation in the Region of Integration of the Lake Tucuruí, Pará state. To map the forest fragments, a supervised classification of images Landsat 8 OLI/TIRS was held. The fragments were divided into six size classes: class 1 (< 10 ha), class 2 (≥ 10 and < 50 ha), class 3 (≥ 50 and < 100 ha), class 4 (≥ 100 and < 500 ha), class 5 (≥ 500 and < 1,000 ha) and class 6 (> 1,000 ha). The Fragstats 4.2 was used to calculate area metrics, density, edge, shape, core area (edge effect simulations: 30 m, 60 m, 90 m, 120 m), proximity and contagion. It was accounted 10,273 landscape fragments, of which the majority (4,446 or 43.28%) belongs to class 1. Although in a larger number, the fragments of smaller classes totalized a small area of remaining forest. The edges total and the edges density did not follow a corresponding standard to the fragments size. The largest fragments have the greatest amount of core area, being less prone to the edge effect, despite of having more irregular shapes. It was determined that the remaining vegetation is with a high level fragmentation and fragments isolation in the landscape. In the Region of Integration of the Lake Tucuruí, Itupiranga is the municipality with a vegetation that contributes the most to the biodiversity conservation, while Nova Ipixuna is the one that demands the most conservation actions.

Recebido em: 15/02/2019

Aceite em: 03/06/2019

1 Introdução

A região amazônica é reconhecida mundialmente por sua riqueza em recursos naturais, abrigando florestas e corpos hídricos com exuberante biodiversidade (Espírito-Santo et al., 2014; Santos et al., 2018). Historicamente, tal abundância tornou-se um forte atrativo à exploração dos seus recursos naturais e à ocupação do seu território, a fim de converter o uso do solo em atividades de cunho econômico, cujos principais usos são: agricultura, pecuária, extração madeireira, mineração e instalação de complexos hidrelétricos (Fapespa, 2014; Espírito-Santo et al., 2014; Rocha, 2015; Santos et al., 2018).

A Região de Integração (RI) do Lago de Tucuruí está inserida nesse contexto de ocupação da região Amazônica, e possui um histórico de impactos ambientais em escala gigantesca, ocasionados pela construção da Usina hidrelétrica de Tucuruí (Pará, 2013; Rocha, 2015). Além disso, atividades como as supracitadas têm contribuído significativamente para a diminuição dos recursos florestais dessa região, culminando na degradação do solo e dos recursos hídricos, assim como na fragmentação das áreas de floresta (Fapespa, 2014).

O processo de fragmentação florestal altera as condições de umidade, temperatura e radiação solar, devido ao efeito de borda que ocorre nos fragmentos (Pirovani et al., 2014). Esse processo também diminui a interação entre espécies vegetais e/ou animais, além de ocasionar efeitos danosos à biodiversidade, como a alteração na cadeia alimentar e nos processos de polinização, extinção de espécies, inserção de espécies invasoras e mudanças na estrutura da floresta (Hentz et al., 2015; Santos et al., 2017).

Tais alterações afetam diretamente as espécies cuja riqueza e abundância dependem das características estruturais dos fragmentos, o que compromete severamente a diversidade e

a dinâmica das comunidades vegetais, bem como o equilíbrio dos ecossistemas (Pirovani et al., 2014; Silva et al., 2015).

Diante dessa realidade, torna-se necessário investigar a fragmentação da floresta a fim de diagnosticar o seu estado atual, identificar locais apropriados para criação de corredores ecológicos, projetar cenários futuros e propor medidas para a conservação desses fragmentos (Abdalla & Cruz, 2015; Fernandes et al., 2017).

Essa investigação pode ser feita através de estudos da ecologia da paisagem (Metzger, 2001), aplicando-se métricas de paisagem, que expõem medidas quantitativas baseadas nas propriedades e no arranjo espacial de fragmentos dentro da paisagem (Saito et al., 2016; Santos et al., 2017). Para analisar a fragmentação florestal, as métricas de paisagem consideram, principalmente, o tamanho, a forma, a área central e o grau de isolamento dos fragmentos na paisagem (McGarigal & Marks, 1995; Metzger, 2003; McGarigal, 2015).

Dessa maneira, essas métricas permitem verificar a distribuição espacial dos fragmentos e compreender sua influência na conservação da biodiversidade e manutenção dos ecossistemas. Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar a fragmentação florestal na Região de Integração do Lago de Tucuruí, estado do Pará.

2 Material e Métodos

Este estudo foi desenvolvido na Região de Integração do Lago de Tucuruí, localizada na porção sudeste do estado do Pará, cujas coordenadas centrais são: latitude 9520000 S e longitude 640000 W. A região é composta pelos municípios de Breu Branco, Goianésia do Pará, Itupiranga, Jacundá, Nova Ipixuna, Novo Repartimento e Tucuruí (Figura 1).

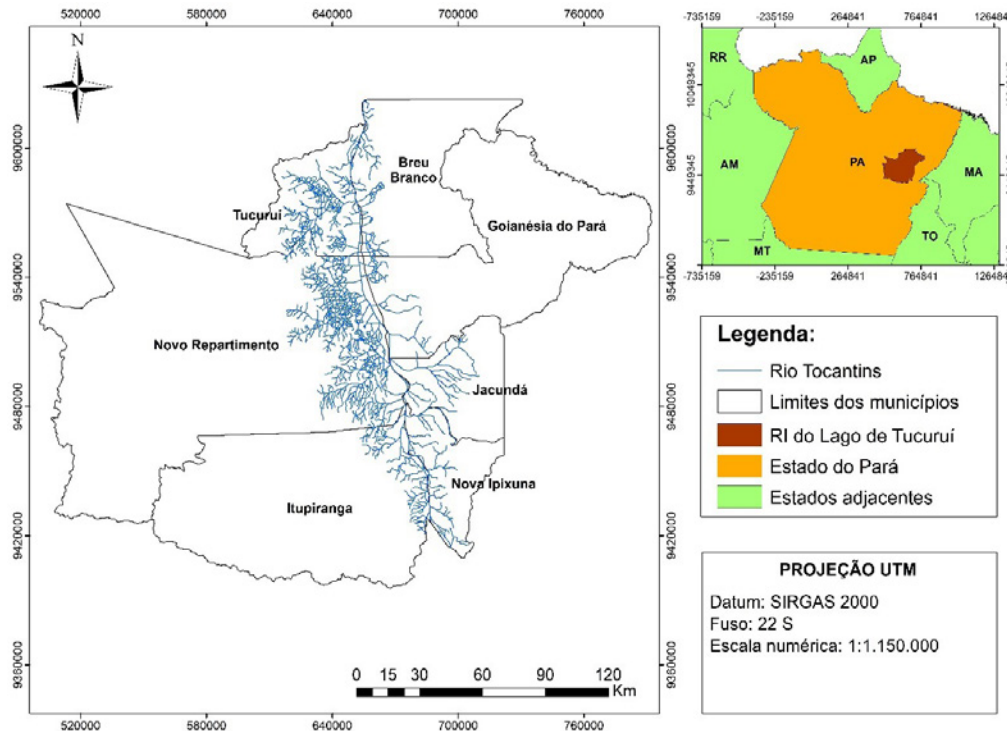


Figura 1. Localização geográfica da Região de Integração do Lago de Tucuruí, estado do Pará, Brasil

Figure 1. Geographic location of the Integration Region of Tucuruí's Lake, Pará state, Brazil

Segundo a estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística para o ano de 2018, a população da RI do Lago de Tucuruí foi de 419.483 habitantes, distribuídos em 39.903,37 km² (3,2% da área total do estado), com densidade demográfica de 10,5 habitantes por km². Nesse território, destacam-se os municípios de Tucuruí, com a maior população (26,73%), e Novo Repartimento, com 15.398,72 km² de extensão territorial, o que corresponde a 38,5% da região (IBGE, 2018).

O clima dessa região é tropical úmido megatérmico (Am), segundo a classificação de Köppen, com índice pluviométrico anual na ordem de 2000 mm e moderado período de estiagem (entre julho e setembro), precipitações inferiores a 50 mm e temperatura média de 26°C. O solo predominante é do tipo Latossolo Amarelo, com ocorrência também de Argissolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo (Pará, 2013).

Quanto à vegetação, registra-se a predominância de Floresta Ombrófila Densa (municípios de Breu Branco, Tucuruí e os setores mais ocidentais de Novo Repartimento e Itupiranga) e uma extensa área com cobertura vegetal intensamente antropizada, particularmente às margens das rodovias PA-150 e BR-230 (Fapespa, 2014).

Para a identificação dos fragmentos florestais, utilizou-se sete imagens do sensor Landsat 8 OLI/TIRS, obtidas no *site* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018), com órbita, ponto e data conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Órbita, ponto e data das imagens Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas neste estudo

Table 1. Orbit, point and date of the Landsat 8 OLI/TIRS imagery used in this study

Órbita	Ponto	Data
223	62	23/06/2018
223	63	23/06/2018
223	64	09/07/2018
224	62	14/06/2018
224	63	14/06/2018
224	64	14/06/2018
225	63	07/07/2018

O processamento digital das imagens foi realizado no programa *ArcGIS* versão 10.5 (Esri, 2016), passando por composição de bandas falsa cor (RGB: 6, 5, 4), equalização radiométrica, reprojeção para o Sistema de Referência Geocêntrico das Américas (SIRGAS 2000) e projeção UTM Zona 22 S. Em seguida, realizou-se uma classificação supervisionada orientada ao objeto utilizando o programa *Ecognition Developer* versão 9.0 (Trimble, 2014), através dos algoritmos *Multiresolution Segmentation* (parâmetro escala 150) para segmentação e *Basic Classification* para gerar a classificação de duas classes: Floresta (objeto da avaliação) e Não Floresta.

A acurácia da classificação foi avaliada através da Exatidão Global e do Índice de Kappa (Congalton, 1991), obtidos por meio de matriz de confusão. Como referência para o resultado de Kappa, foi utilizada a classificação de Fonseca (2000), que categoriza o valor obtido como péssimo (< 0%), ruim (> 0% e ≤ 20%), razoável (> 20% e ≤ 40%), bom (> 40% e ≤ 60%), muito bom (> 60% e ≤ 80%) e excelente (> 80% e ≤ 100%).

A fim de aprimorar as avaliações sobre o grau de conservação e o efeito de borda, os fragmentos florestais foram agrupados em seis classes de tamanho, contendo as seguintes medidas de área: classe 1 (< 10 ha), classe 2 (≥ 10 e < 50 ha), classe 3 (≥ 50 e < 100 ha), classe 4 (≥ 100 e < 500 ha), classe 5 (≥ 500 e < 1000 ha) e classe 6 (> 1000 ha). Assim, elaborou-se um mapa destacando os fragmentos florestais de acordo com a sua classe de tamanho, constituindo a avaliação de toda a paisagem. De maneira individual, averiguou-se também o estado da fragmentação florestal no território de cada município que compõe a região.

A aplicação das métricas de paisagem foi feita através do programa *Fragstats* versão 4.2 (McGarigal, 2015). As métricas foram selecionadas conforme as recomendações da literatura, quanto à sua adequação em avaliações da fragmentação florestal (Pirovani et al., 2014; Silva et al., 2015; Hentz et al., 2015; Abdalla & Cruz, 2015; Saito et al., 2016; Santos et al., 2017; Fernandes et al., 2017).

Dessa maneira, procedeu-se uma análise ao nível de classe, com métricas pertencentes a cinco grupos: 1 – área, densidade e borda (mensuração da área dos fragmentos, bem como da sua presença na paisagem e quantidade de bordas); 2 – forma (avaliação e qualificação do formato dos fragmentos); 3 – área central (dimensionamento do efeito de borda sofrido pelos fragmentos); 4 – contágio e dispersão (avaliação da conectividade entre os fragmentos na paisagem); 5 – proximidade e isolamento (quantificação da distância entre fragmentos) (McGarigal, 2015), conforme exposto na Tabela 2. Para as simulações do efeito de borda feitas através das métricas de área central, utilizou-se as distâncias de 30 m, 60 m, 90 m e 120 m (Santos et al., 2017).

Tabela 2. Métricas de paisagem utilizadas para avaliar a fragmentação florestal

Table 2. Landscape metrics used to evaluate forest fragmentation

Grupo	Métrica	Sigla e intervalo da métrica (unidade)
1	Área da classe	CA > 0 (ha)
	Área média dos fragmentos	AREA_MN > 0 (ha)
	Porcentagem da classe na paisagem	0 < PLAND ≤ 100 (%)
	Número de fragmentos	NP ≥ 1 (adimensional)
	Total de bordas	TE ≥ 0 (km)
	Densidade de bordas	ED ≥ 0 (m/ha)
	Índice de forma médio	SHAPE_MN ≥ 1 (adimensional)
2	Total de área central	TCA ≥ 0 (ha)
	Número de áreas centrais disjuntas	NDCA ≥ 0 (adimensional)
3	Índice de área central médio	0 < CAI_MN ≤ 100 (%)
	Índice de conectividade de manchas	0 < COHESION < 100 (%)
4	Distância média do vizinho mais próximo	ENN_MN ≥ 0 (m)

Das métricas pertencentes ao grupo 1, descreve-se o seguinte: a área da classe (CA) quantifica a composição da paisagem, sendo que

maiores valores de CA indicam domínio da matriz. A área média dos fragmentos (AREA_MN) indica o grau de fragmentação pela relação entre o número de fragmentos e a área total ocupada pela classe. A porcentagem da classe na paisagem (PLAND) mensura a abundância proporcional de cada tipo de mancha na paisagem. O número de fragmentos (NP) contabiliza o grau de fragmentação ou divisão existente na paisagem. O total de bordas (TE) é uma medida absoluta do comprimento total da borda, observada em determinado tipo de mancha através da classe à qual pertence. A densidade de bordas (ED) reporta o comprimento da borda em uma base por área unitária, facilitando a comparação entre paisagens de tamanhos variados.

O grupo 2 é representado pelo índice de forma médio (SHAPE_MN), que expressa a complexidade da forma dos fragmentos, comparando-as a uma forma padrão, e quanto menor o valor de SHAPE_MN em formas irregulares é a forma do fragmento, sendo benéfica à conservação.

Em relação ao grupo 3, pode-se fazer as seguintes considerações sobre as suas métricas: o total de área central (TCA) apresenta o quantitativo de floresta isenta do efeito de borda sofrido pelos fragmentos, sendo que altos valores de TCA indicam tipos de fragmentos com melhor estrutura para conservação da biodiversidade. O número de áreas centrais disjuntas (NDCA) contabiliza o número de áreas centrais com base no efeito de borda que acomete os fragmentos. O índice de área central médio (CAI_MN) é um valor relativo que quantifica a área central, de modo que os maiores valores de CAI_MN estão

em função da quantidade de área central, apesar do tamanho, da forma e largura de borda do fragmento.

O índice de conectividade de manchas (COHESION) compõe o grupo 4, tal métrica expõe o grau de conectividade estrutural entre os fragmentos, tendo o seu valor aumentado à medida que cresce essa ligação. Já o grupo 5 é constituído pela distância média do vizinho mais próximo (ENN_MN), a qual expressa o isolamento dos fragmentos da classe na paisagem, e menores valores de ENN indicam melhores condições dos fragmentos para a conservação.

3 Resultados e Discussão

A avaliação da acurácia na classificação resultou em Exatidão Global = 98,66% e Índice de Kappa = 98,27%. Esses valores evidenciam que o algoritmo utilizado para classificar as imagens Landsat 8 OLI/TIRS teve desempenho satisfatório. O resultado para o Índice de Kappa categoriza a classificação como Excelente (Fonseca, 2000).

A partir da classificação, contabilizou-se 10.273 fragmentos florestais na paisagem. Ao observar o número de fragmentos (NP) por classes de tamanho, destacaram-se a classe 1 (NP = 4.446) e classe 2 (NP = 3.773), que representaram 43,28% e 36,73% do total de fragmentos, respectivamente. A representatividade em NP e porcentagem da classe 3 até a classe 6 seguiu a seguinte ordem: NP = 845 (8,23%), NP = 917 (8,93%), NP = 156 (1,52%) e NP = 136 (8,32%). A Figura 2 ilustra a distribuição e a densidade de fragmentos por classe de tamanho na RI do Lago de Tucuruí.

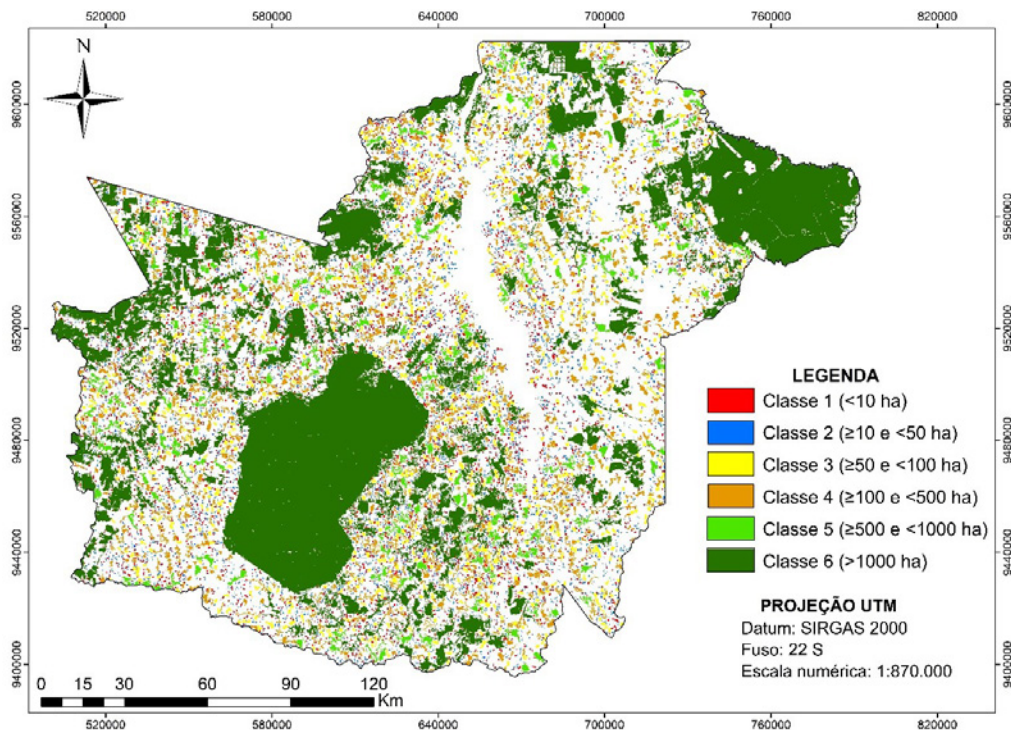


Figura 2. Distribuição espacial dos fragmentos florestais por classe de tamanho

Figure 2. Spatial distribution of forest fragments by size class

A maior ocorrência de fragmentos menores que 10 hectares indica que a vegetação remanescente na RI do Lago de Tucuruí encontra-se altamente fragmentada, sendo um fator negativo para a interação entre os ecossistemas e a

conservação da biodiversidade presente na paisagem (Metzger, 2001, 2003). Esse alto grau de fragmentação florestal pode estar diretamente relacionado às atividades agropecuárias desenvolvidas na região.

O *Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental da RI Lago de Tucuruí* mostra que o setor agropecuário é o que mais contribui para o PIB da região (8,69%) (Fapespa, 2014). Isso indica que a vegetação nativa vem sendo substituída por pastagem para a criação de gado, bem como por cultivos agrícolas. Tal substituição ocorreu em um padrão aleatório, sem favorecer a continuidade das áreas de floresta com as que se encontravam em propriedades vizinhas.

A somatória da área das classes (CA) revelou que a RI do Lago de Tucuruí possui 1.635.288,04 ha de floresta, o que corresponde a 40,95% de sua extensão territorial. De acordo com o *Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável do Lago de Tucuruí*, até 2008 essa região possuía 49,35% de seu território coberto por floresta (Pará, 2013). Essas informações mostram que a RI do Lago de Tucuruí perdeu 8,4% (335.188 ha) de sua floresta nos últimos dez anos. As áreas florestadas foram fragmentadas e convertidas, principalmente, em uso para as atividades agropecuárias (Fapespa, 2014).

De toda maneira, é necessário considerar que apenas a presença de floresta não é suficiente para promover a interação entre os indivíduos que compõe o ecossistema, e nem para garantir a sobrevivência das espécies animais e vegetais. É imprescindível que os fragmentos florestais estejam intimamente conectados, a fim de favorecer o fluxo gênico entre esses ambientes (Metzger, 2001, 2003; Santos et al., 2017).

Excetuando-se os valores obtidos para as classes 6 e 1, que agrupam fragmentos maiores que 1.000 ha e menores que 10 ha, respectivamente, as métricas CA e PLAND não apresentaram resultados correspondentes ao tamanho dos fragmentos comportados pela classe (Tabela 3). A classe 4, por exemplo, teve maior expressão de área (CA = 206.265,52 ha) e de percentual de floresta na paisagem (PLAND = 12,61%) que a classe 5, tendo essa alcançado CA = 113.505,68 ha e PLAND = 6,94%; essa mesma relação ocorre entre as classes 2 e 3.

Tabela 3. Resultados das métricas de paisagem aplicadas às classes de tamanho

Table 3. Results of landscape metrics applied to size classes

Classe	Métrica					
	CA	AREA_MN	PLAND	TE	ED	SHAPE_MN
1 (< 10 ha)	25.823,28	5,81	1,58	6.637,68	40,59	1,53
2 (\geq 10 e < 50 ha)	93.042,72	24,66	5,69	15.338,64	9,38	2,03
3 (\geq 50 e < 100 ha)	63.673,36	75,35	3,89	7.657,60	4,68	2,59
4 (\geq 100 e < 500 ha)	206.265,52	224,94	12,61	18.270,92	11,17	3,30
5 (\geq 500 e < 1000 ha)	113.505,68	727,60	6,94	8.214,12	5,02	4,86
6 (> 1000 ha)	1.132.977,48	8.330,72	69,28	30.994,64	18,95	7,39
Total	1.635.288,04	9.389,07	100	87.113,60	89,80	–

CA = Área da classe (ha); AREA_MN = Área média dos fragmentos (ha); PLAND = Porcentagem de fragmentos da mesma classe (%); TE = Total de bordas (km); ED = Densidade de bordas (m/ha); SHAPE_MN = Índice de forma médio (adimensional)

Em relação a área média dos fragmentos (AREA_MN), os resultados evidenciaram uma relação diretamente proporcional ao tamanho dos fragmentos agrupados pelas classes, sendo que quanto maior o tamanho dos fragmentos abrangidos na classe, maior o valor desse índice.

O total de bordas (TE) foi maior na classe 6, e sequencialmente nas classes 4, 2 e 5, tendo as classes 1 e 3 os menores valores para essa métrica. Tais resultados mostram que há uma tendência de que classes com maior abrangência de área apresentem maiores valores de TE, tendo em vista que essas também possuem grandes perímetros, assim como ocorre proporcionalmente também nas menores classes (Hentz et al., 2015). No caso do resultado atípico das classes 5 e 3, provavelmente a menor quantidade de bordas pode estar ligada ao pequeno número de fragmentos em relação às demais classes, podendo significar também que os fragmentos nessas classes são pouco recortados.

Apesar do destaque da classe 6 quanto ao TE, essa ocupou o segundo lugar em relação à densidade de borda (ED), com total de 18,95 m ha⁻¹. Isso se deve ao tamanho da área dos fragmentos agrupados nessa classe, que contribui unitariamente para o crescimento do TE, mas não necessariamente possui maior acúmulo de borda por unidade de área, como também constataram Abdalla & Cruz (2015) e Hentz et al. (2015).

Nesse sentido, a classe 1 foi a que apresentou menor somatória de bordas (TE = 6.637,68) e, em contrapartida, o maior quantitativo de borda por área (ED = 40,59). Esses valores apontam para um maior efeito de borda sobre os fragmentos menores que 10 ha, o que culmina em decréscimo do grau de conservação desses remanescentes florestais (Pirovani et al., 2014).

Para Santos et al. (2017), os índices relacionados à borda sintetizam a dimensão da área de influência do efeito de borda. Os autores enfatizam que esse tipo de avaliação é necessária para a compreensão dos processos biológicos ligados à fragmentação, que geralmente se iniciam pela área da borda.

O índice de forma médio (SHAPE_MN) revelou que há uma tendência: quanto menor a área dos fragmentos comportados pela classe, mais regular é a forma dos fragmentos (Tabela 3). Essa tendência também foi constatada nos estudos de Pirovani et al. (2014), Hentz et al. (2015), Abdalla & Cruz (2015), Silva et al. (2015), Saito et al. (2016) e Santos et al. (2017).

Os fragmentos com formato mais regular, geralmente, possuem as medidas que compõe o perímetro semelhantes, e assim tendem a sofrer menor influência de fatores externos (alterações na luminosidade, temperatura, umidade e velocidade do vento), justamente porque o seu formato favorece o “isolamento” da

área central, o que diminui o impacto do efeito de borda. Não obstante, é necessário aliar a questão da regularidade da forma com o tamanho do fragmento e a quantidade de área central, para então avaliar com mais precisão a influência de tal efeito sobre o remanescente florestal.

A área central (núcleo) expressa a qualidade dos fragmentos de modo mais eficiente que a área total, representando a área

de efetiva conservação apesar do efeito de borda (McGarigal & Marks, 1995; Santos et al., 2017). Assim, através dos índices de área central constatou-se que o aumento da distância de borda é inversamente proporcional a quantidade de área central dos fragmentos. Esse comportamento pode ser notado principalmente nos resultados do total de área central (TCA) e do índice de área central médio (CAI_MN) (Tabela 4).

Tabela 4. Resultados das métricas de área central por classe de tamanho
Table 4. Results of core area metrics by size class

Classe	Métrica	Distância de borda (m)			
		30	60	90	120
1 (< 10 ha)	TCA	13.257,44	3.112,48	529,20	29,28
	NDCA	6,275	4,256	1,325	187
	CAI_MN	47,87	9,34	1,39	0,07
2 (≥ 10 e < 50 ha)	TCA	62.957,40	31.986,24	16.229,52	7.240,20
	NDCA	7,359	7,716	5,289	3,488
	CAI_MN	66,07	31,63	14,87	5,96
3 (≥ 50 e < 100 ha)	TCA	48.475,96	31.632,24	21.253,04	13.675,12
	NDCA	2,343	2,623	2,072	1,772
	CAI_MN	75,97	49,36	33,01	21,11
4 (≥ 100 e < 500 ha)	TCA	169.791,80	127.927,68	99.877,96	77.280,40
	NDCA	4,105	4,591	3,548	3,236
	CAI_MN	81,47	60,30	46,26	35,05
5 (≥ 500 e < 1000 ha)	TCA	97.050,92	77.899,88	64.674,48	53.689,52
	NDCA	1,505	1,731	1,290	1,168
	CAI_MN	85,41	68,45	56,74	47,04
6 (> 1000 ha)	TCA	1.070.664,92	997.024,36	943.919,28	897.871,36
	NDCA	4,872	5,159	3,772	3,355
	CAI_MN	89,05	76,15	66,95	59,10

TCA = Total de área central (ha); NDCA = Número de áreas centrais disjuntas (adimensional); CAI_MN = Índice de área central médio (%)

O número de áreas centrais disjuntas (NDCA) foi superior ao número de fragmentos (NP) em todas as classes de tamanho e para todas as distâncias de borda, exceto na classe 1 para bordas a partir de 30 m e na classe 2 para borda de 120 m. Tal resultado está ligado ao formato dos fragmentos que, em regiões estreitas, são recortados pelo efeito de borda, originando outros fragmentos com área central menor, fato corroborado pela diminuição nos valores do TCA. Assim, a elevação do grau de fragmentação e a diminuição da área central dos fragmentos reduzem o fluxo gênico entre populações, comprometendo a manutenção dos ecossistemas e os processos ecológicos.

A exceção apresentada demonstra que os fragmentos com menor tamanho de área estão mais suscetíveis ao efeito de borda, especialmente os com área inferior a 10 ha (classe 1). Isso decorre da intensidade do efeito de borda sobre os fragmentos, que devido à pouca quantidade de área central passa a dominar toda sua área ao invés de recortá-los. Excluindo-se a informação sobre área central para não generalizar, a mesma interpretação se aplica ao fato de que o NDCA cresce até quando se considera uma borda de 60 m (exceto na classe 1), e passa a decrescer para bordas de 90 m e 120 m.

Para a distância de borda de 30 m, a classe 1 apresenta TCA igual 13.257,44 ha, com índice de área central médio (CAI_MN) de 47,87%. Isso significa que da área total dos fragmentos dessa classe (CA = 25.823,28 ha), apenas esse valor de TCA corresponde à área central. Dessa maneira, 52,13% da área total dos fragmentos está sob efeito de borda de 30 m, sendo que esse valor se estende para quase 100% quando se considera bordas de 90 e 120 m, CAI_MN = 1,39% e CAI_MN = 0,07%, respectivamente.

Ao investigar a fragmentação florestal no município de Paraíba do Sul-RJ, Santos et al. (2017) registraram resultado semelhante, no qual a classe de menor tamanho (< 5 ha), não apresentou área central quando foi considerada uma borda maior que 90 m. Para essa mesma classe de tamanho, Silva et al. (2015) constataram a inexistência de área central em bordas a partir de 40 m. Entretanto, ao considerar a mesma distância de borda e os fragmentos menores que 10 ha, esses autores verificaram um índice de área central igual a 34,60%, tendo mais área propícia para a conservação da biodiversidade.

Considerando todas as distâncias de borda, a classe 1 foi a que sofreu maior redução média no CAI_MN (87%), seguida pela

classe 2 (55%), classe 3 (35%), classe 4 (25%), classe 5 (18%) e classe 6 (13%). Todos esses resultados corroboram com o que diversas pesquisas têm demonstrado em relação à fragilidade dos fragmentos menores perante a intensidade do efeito de borda (Abdalla & Cruz, 2015; Silva et al., 2015; Santos et al., 2017).

Apesar disso, é necessário destacar que fragmentos de tamanho reduzido são importantes na paisagem, uma vez que funcionam como *stepping stones* (“trampolins ecológicos”), favorecendo a conectividade entre fragmentos e, conseqüentemente, a locomoção e o fluxo migratório de animais entre fragmentos maiores (Metzger, 2001, 2003; Pirovani et al., 2014; Abdalla & Cruz, 2015).

Vale ressaltar também a importância dos fragmentos maiores como abrigo para as comunidades animais e vegetais, justamente

por possuírem o maior quantitativo de área central (Hentz et al., 2015). A classe 6, por exemplo, apesar de possuir fragmentos com formato mais irregular, permanece como a que apresenta o maior somatório de área efetivamente livre de influências externas (Tabelas 3 e 4).

Do mesmo modo que ocorreu com o número de fragmentos (NP) e a área média (AREA_MN), o índice de conectividade de manchas (COHESION) se mostrou diretamente proporcional ao tamanho dos fragmentos comportados pela classe. Na classe 6 essa métrica resultou em COHESION = 99,89% e na classe 1 em COHESION = 92,14%, representando as classes com maior e menor conexão entre fragmentos na paisagem, respectivamente (Figura 3A).

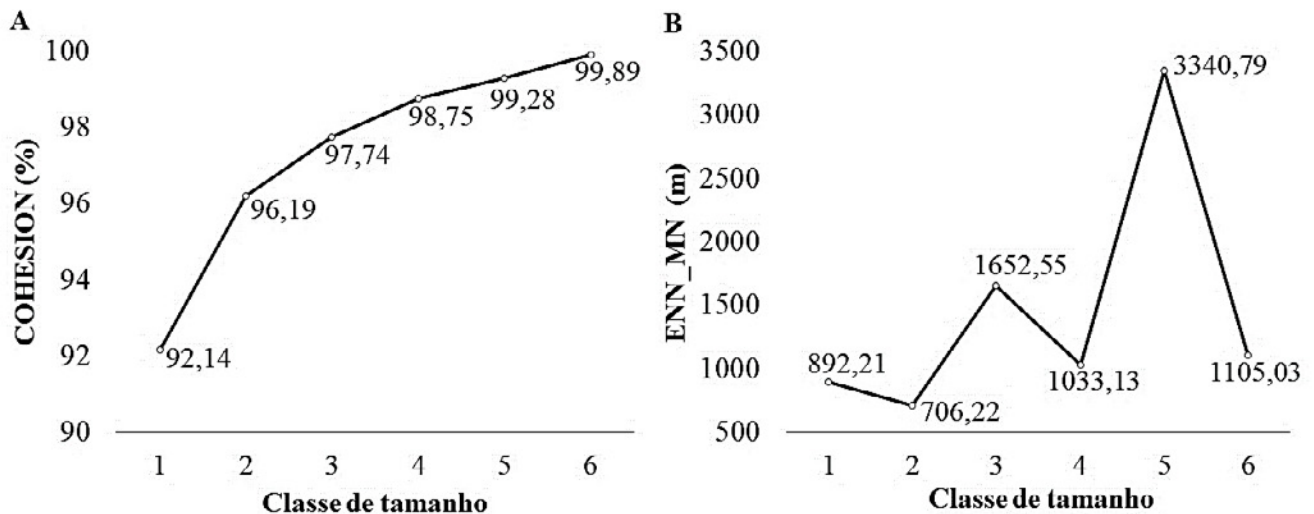


Figura 3. Conectividade (A) e grau de isolamento (B) dos fragmentos por classe de tamanho

Figure 3. Connectivity (A) and isolation level (B) of fragments by size class

COHESION = Índice de conectividade de manchas (%); ENN_MN = Distância média do vizinho mais próximo (m)

Quanto ao grau de isolamento dos fragmentos na paisagem, expresso pela distância média do vizinho mais próximo (ENN_MN), os resultados diferenciaram-se num efeito “zigzag” entre as classes (Figura 3B). Apesar de ocuparem grandes áreas, os fragmentos com tamanho menor ou igual a 500 ha e menor que 1000 ha (classe 5) são os que estão mais distantes uns dos outros (ENN_MN = 3.340,79 m), e o oposto foi observado para a classe 2 (ENN_MN = 706,22 m).

Em razão do perfil de atividades socioeconômicas desenvolvidas nessa região, acredita-se que o setor agropecuário exerceu forte influência nesse padrão estrutural de fragmentação (Pará, 2013; Fapespa, 2014). Os resultados sobre a elevada distância média entre fragmentos em todas as classes demonstram que a mudança no uso e ocupação do solo (de floresta nativa a áreas de pasto e cultivos agrícolas) ocorreu de maneira desordenada na região.

Esse desordenamento influiu para que os fragmentos estejam isolados na paisagem e distantes dos que pertencem à mesma classe de tamanho. Desse modo, tendo em vista que os fragmentos de mesma classe estão distantes entre si, verifica-se que grande parte da conexão entre esses é feita pelos que pertencem a outra classe, sobretudo nas maiores, que obtiveram elevados valores de COHESION (Figura 3A).

Concernente à distância entre fragmentos, Souza et al. (2014) esclarecem que distâncias médias entre fragmentos menores

que 60 m são classificadas como de baixo isolamento, e os menores que 100 m são considerados isolamento moderado; entretanto, é uma distância limitante para algumas espécies. A exemplo disso, Awade & Metzger (2008) verificaram que algumas espécies de aves de sub-bosque evitam cruzar áreas abertas com distância superior a 40 m.

Quando se avalia a fragmentação florestal no território de cada município que compõe a RI do Lago de Tucuruí, verifica-se que a somatória do número de fragmentos (NP) sobe para 10.294. Essa diferença ocorre porque alguns fragmentos, principalmente os grandes, são recortados por se encontrarem entre os limites de dois ou mais municípios, o que contribui para o aumento no valor dessa métrica.

Dessa região, Novo Repartimento é o município que possui o maior número de fragmentos florestais (NP = 4.249), além de ser superior aos demais quanto à quantidade de área de floresta (CA = 669.373 ha), e desse modo possui a maior representação na paisagem (PLAND = 41,50%) (Figura 4A, B e D). Em contrapartida, é superado por Goianésia do Pará e Itupiranga em relação à área média dos fragmentos, tendo esses apresentado AREA_MN = 242,96 ha e AREA_MN = 157,67 ha, respectivamente, enquanto Novo Repartimento mostrou AREA_MN = 157,54 ha (Figura 4C).

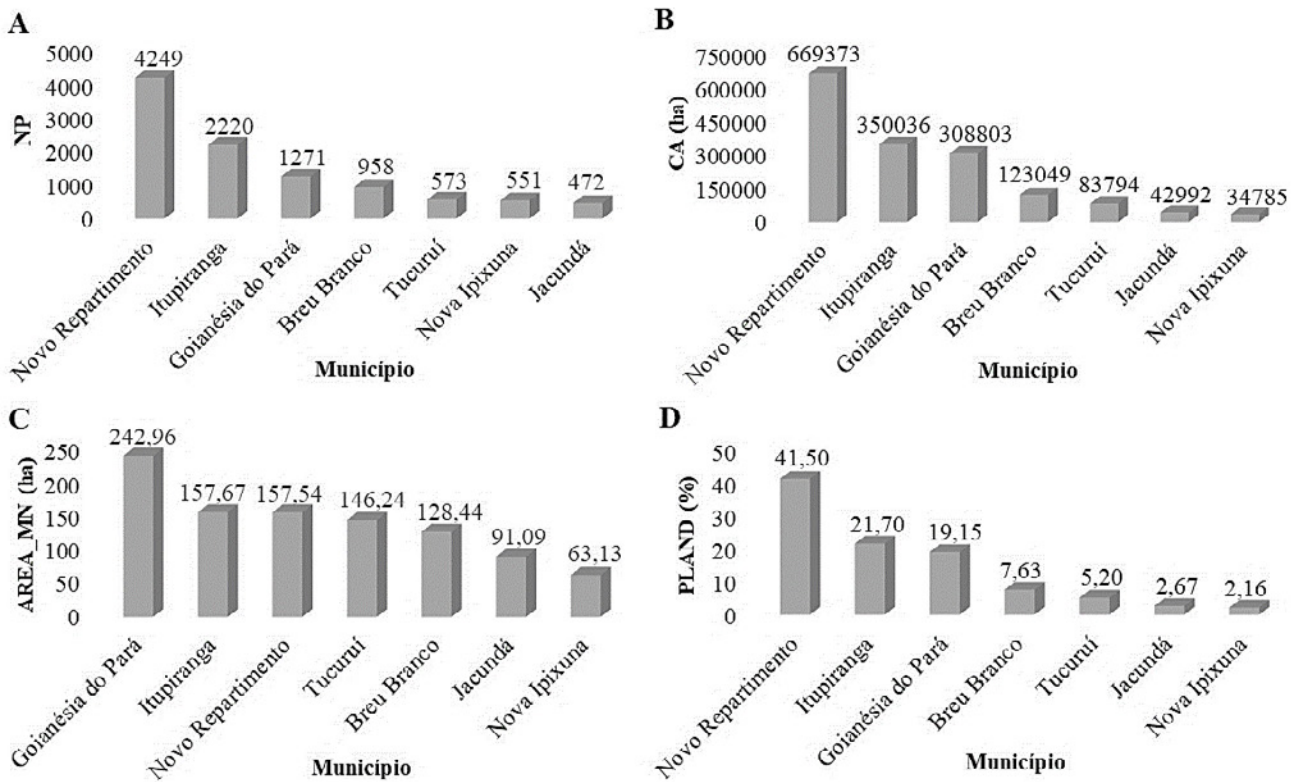


Figura 4. Resultados das métricas de densidade (A) e área (B, C e D) por município pertencente à Região de Integração do Lago de Tucuui, estado do Pará, Brasil

Figure 4. Results of density (A) and area (B, C, D) metrics per municipality of the Integration Region of Tucuui's Lake, Pará state, Brazil

NP = Número de fragmentos (adimensional); CA = Área da classe (ha); AREA_MN = Área média dos fragmentos (ha); PLAND = Porcentagem de fragmentos da mesma classe (%)

Ao comparar a extensão territorial dos municípios (Novo Repartimento = 1.539.871,6 ha, Itupiranga = 788.010,9 ha, Goianésia do Pará = 702.394,1 ha, Breu Branco = 394.191,1 ha, Tucuui = 208.618,9 ha, Jacundá = 200.831,5 ha, Nova Ipixuna = 156.418,4 ha), com a área de floresta que cada um possui (CA), é possível inferir que Itupiranga supera a todos com 44,42% do seu território coberto por floresta, seguido por Goianésia do Pará (43,96%), Novo Repartimento (43,47%) e Tucuui (40,17%).

Os municípios com menor proporção territorial de floresta são Breu Branco, com 31,22%, Nova Ipixuna, com o valor de 22,24%, e Jacundá, que apresentou 21,41% do seu território com florestas. Logo, visualiza-se que mesmo Novo Repartimento tendo a maior extensão territorial da região e alcançando os maiores valores de NP, CA e PLAND, esse município ocupa apenas o terceiro lugar em relação à proporção de floresta considerando o território dos municípios.

Em termos de área de floresta, o município de Jacundá ocupou a penúltima colocação, com CA = 42.992 ha e PLAND = 2,67%, e Nova Ipixuna em último lugar apresentou CA = 34.785 ha e PLAND = 2,16%, (Figura 4B e D). Essa colocação é invertida quando se observa o NP de cada um (Figura 4A). Isso significa que além de ter os fragmentos com menor AREA_MN (Figura 4C), a vegetação remanescente de Nova Ipixuna é proporcionalmente a mais fragmentada da RI do Lago de Tucuui.

Tal inversão entre a colocação desses dois municípios também ocorre ao comparar o valor de CA de cada um com os seus respectivos valores de total de bordas (TE), densidade de bordas (ED) e índice de forma médio (SHAPE_MN). Apesar de Nova Ipixuna possuir menor área de floresta (CA) que Jacundá, este apresentou TE = 3.680,64 km, ED = 2,28 m ha⁻¹ e SHAPE_MN = 2,09, enquanto Jacundá expôs menores valores para essas três métricas (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados das métricas de paisagem aplicadas aos municípios
Table 5. Results of landscape metrics applied to municipalities

Município	Métrica				
	TE	ED	SHAPE_MN	COHESION	ENN_MN
Novo Repartimento	36.029,8	22,34	2,09	99,71	168,87
Itupiranga	19.290,6	11,96	2,15	99,68	162,24
Goianésia do Pará	11.523,56	7,14	2,12	99,75	224,60

Table 5. Continuação

Table 5. Continues

Município	Métrica				
	TE	ED	SHAPE_MN	COHESION	ENN_MN
Breu Branco	8.725,84	5,41	2,18	99,47	208,90
Tucuruí	5.074,28	3,15	2,17	99,56	159,94
Nova Ipixuna	3.680,64	2,28	2,09	98,84	215,38
Jacundá	3.174,72	1,97	2,03	99,27	298,83
Total	87.499,44	54,25	–	–	–

TE = Total de bordas (km); ED = Densidade de bordas (m ha⁻¹); SHAPE_MN = Índice de forma médio (adimensional); COHESION = Índice de conectividade de manchas (%); ENN_MN = Distância média do vizinho mais próximo (m)

Nesse sentido, a comparação entre os municípios com menor CA mostra mais um ponto negativo sobre o remanescente florestal do município de Nova Ipixuna, evidenciando que os seus fragmentos estão mais suscetíveis ao efeito de borda devido à sua quantidade de bordas e à irregularidade da forma dos fragmentos. Esse resultado foi diferente do padrão descrito por Hentz et al. (2015) sobre classes com maior abrangência de área possuem os maiores perímetros. Por outro lado, excetuando-se esses dois municípios, os demais se enquadraram nesse padrão.

Vale ressaltar que em termos de irregularidade da forma dos fragmentos, destacam-se Breu Branco (SHAPE_MN = 2,18), Tucuruí (SHAPE_MN = 2,17), Goianésia do Pará (SHAPE_MN = 2,15) e Itupiranga (SHAPE_MN = 2,12). Nesse aspecto, a vegetação de Tucuruí é a que pode ser mais afetada pelo efeito de borda, tendo em vista a sua menor porção de floresta e os fragmentos com formato bastante irregular (Abdalla & Cruz, 2015; Silva et al., 2015; Santos et al., 2017).

De toda maneira, é preciso destacar que a vegetação de todos os municípios da RI do Lago de Tucuruí possui fragmentos com elevada irregularidade de forma, com valores distantes de um, que é o valor que representa fragmentos com o formato ideal de acordo com esse índice. Sendo assim, todo o remanescente florestal dessa região está propenso a sofrer grandes interferências de fatores externos, caracterizando o efeito de borda (McGarigal & Marks, 1995; Metzger, 2001).

Dentre os municípios da região investigada, Goianésia do Pará, Novo Repartimento e Itupiranga são os que apresentaram os maiores valores de índice de conectividade de manchas (COHESION), indicando uma superioridade aos demais em relação à conectividade estrutural entre os fragmentos presentes em seus territórios. Entretanto, Goianésia do Pará exibe a segunda maior distância média do vizinho mais próximo (ENN_MN), indicando que seus fragmentos estão distantes entre si, mesmo apresentando alto valor de COHESION (Tabela 5).

Apesar dos bons indicadores exibidos pelos municípios Tucuruí, Itupiranga e Novo Repartimento para ENN, é necessário avaliar que de modo geral os fragmentos florestais da RI do Lago de Tucuruí possuem elevado grau de isolamento, o que é extremamente prejudicial para o fluxo gênico das espécies (Silva et al., 2015). Essa realidade evidencia a carência de intervenções que contribuam para a ligação entre remanescentes florestais, auxiliando na manutenção da floresta e da sua biodiversidade.

Além dos outros fatores negativos sobre a floresta remanescente em Nova Ipixuna, esse território apresentou a menor conexão

entre as manchas, com COHESION = 98,84%, estando essas distantes umas das outras (ENN_MN = 215,38 m). Ao combinar esses elementos com a baixa proporção territorial de floresta, o alto grau de fragmentação, o menor tamanho médio dos fragmentos, a quantidade de bordas e a irregularidade na forma dos fragmentos (os dois últimos consideraram os municípios de menor CA), pode-se constatar que Nova Ipixuna é o município da RI do Lago de Tucuruí com a vegetação que menos favorece a conservação da biodiversidade.

Por outro lado, apesar dos resultados negativos sobre a quantidade de bordas e a irregularidade na forma dos fragmentos, que seguem uma tendência de tamanho de área (Pirovani et al., 2014; Abdalla & Cruz, 2015; Silva et al., 2015; Saito et al., 2016; Santos et al., 2017), a combinação dos resultados exibidos pelas métricas de paisagem apontam para Itupiranga como o município com o remanescente florestal que oferece melhores condições para a sobrevivência de espécies da flora e da fauna, tendo a estrutura mais propícia à manutenção dos ecossistemas.

Visto o estado da fragmentação estrutural da floresta na região investigada, é importante destacar a necessidade da adoção de estratégias de conservação desses remanescentes florestais, como a criação de cinturões verdes, visando reduzir o contato da vegetação nativa com fatores externos que causam o efeito de borda. Além disso, é imprescindível que sejam realizadas ações de implantação e desenvolvimento de corredores ecológicos, a fim de contribuir com o aumento da conectividade entre fragmentos, favorecendo a interação entre as espécies que compõem o ecossistema.

4 Conclusões

A vegetação remanescente da Região de Integração do Lago de Tucuruí é composta por 10.273 fragmentos, cuja maioria possui menos que 10 ha, o que indica alto grau de fragmentação florestal. Nesse território, quanto maior o tamanho do fragmento, maior a conectividade e a área central, e desse modo estão menos suscetíveis ao efeito de borda, mesmo apresentando formatos mais irregulares.

Em geral, os fragmentos florestais possuem alto grau de isolamento, condição que aponta para a necessidade de medidas que incentivem a formação de corredores ecológicos e a melhoria da qualidade ambiental dos fragmentos. Dessa região, Itupiranga é o município com a vegetação que mais favorece a conservação da biodiversidade e a manutenção dos ecossistemas, enquanto Nova Ipixuna é o que mais demanda ações de conservação.

Referências

- ABDALLA, L. S.; CRUZ, C. B. M. Análise de fragmentação florestal no município de Silva Jardim, APA do Rio São João, RJ. *Revista Brasileira de Cartografia*, Monte Carmelo, v. 67, n. 1, p. 169-184, 2015.
- AWADE, M.; METZGER, J. P. Importance of functional connectivity to evaluate the effect of habitat fragmentation for three Atlantic Rainforests birds. *Austral Ecology*, Hoboken, n. 33, p. 863-871, 2008.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991. doi: 10.1016/0 034-4257(91)90048-B
- ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; GLOOR, M.; KELLER, M.; MALHI, Y.; SAATCHI, S.; NELSON, B.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; PEREIRA, C.; LLOYD, J.; FROLKING, S.; PALACE, M.; SHIMABUKURO, Y. E.; BRIENEN, R. J. W.; ASNER, G. P.; BOYD, D. S.; PHILLIPS, O. L. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance. *Nature Communications*, London, v. 5, n. 3434, p. 1-6, 2014. doi: 10.1038/ncomms4434.
- ESRI. *ArcGIS 10.5: software*. 2016. Disponível em: <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>. Acesso em: 22 out. 2018.
- FAPESPA – FUNDAÇÃO AMAZÔNICA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ. *Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental da Região de Integração Lago de Tucuruí*. 2014. Disponível em: http://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Regi_ao_Integracao_Lago_de_Tucuruui.pdf. Acesso em: 4 dez. 2018.
- FERNANDES M. R. M.; MATRICARDI, E. A. T.; ALMEIDA, A. Q.; FERNANDES, M. M. Análise temporal da fragmentação florestal na região semiárida de Sergipe. *Nativa*, Sinop, v. 5, n. 6, p. 421-427, 2017. doi: 10.5935/2318-7670.v05n06a07
- FONSECA, L. M. G. *Processamento digital de imagens*. Brasília: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 105p.
- HENTZ, A. M. K.; CORTE, A. P. D.; DOUBRAWA, B.; SANQUETTA, C. R. Avaliação da fragmentação dos remanescentes florestais da Bacia hidrográfica do rio Iguaçú – PR, Brasil. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 11, n. 21, p. 2842-2858, 2015.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo demográfico*. 2018. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novportal/so_ciaais/populacao.html. Acesso em: 12 nov. 2018.
- MCGARIGAL, K. *Fragstats v. 4.2: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps*. Amherst: University of Massachusetts, 2015. 182p.
- MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. *Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure – reference manual*. Corvallis: Oregon State University, 1995. 141p.
- METZGER, J. P. Como restaurar a conectividade de paisagens fragmentadas? In: KAGEYAMA, P. Y.; OLIVEIRA, R. E.; MORAES, L. F. D.; ENGEL, V. L.; GANDARA, F. B. *Restauração ecológica de ecossistemas naturais*. 2. ed. Botucatu: Fepaf, 2003. p. 51-76.
- METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? *Biota Neotropica*, Campinas, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2001.
- PARÁ. *Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável do Lago de Tucuruí*. 2013. Disponível em: http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=0a6ea_c82-0b58-40bf-a60e-c80828c0ec90&groupId=10157. Acesso em: 10 dez. 2018.
- PIROVANI, D. B.; SILVA, A. G.; SANTOS, A. R.; CECÍLIO, R. A.; GLERIANI, J. M.; MARTINS, S. V. Análise espacial de fragmentos florestais na Bacia do Rio Itapemirim, ES. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 271-281, 2014.
- ROCHA, G. M. Usinas hidrelétricas e mudanças demográficas na Amazônia brasileira. *Nadir: revista eletrônica de geografia austral*, Chile, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2015.
- SAITO, N. S.; MOREIRA, M. A.; SANTOS, A. R.; EUGENIO, F. C.; FIGUEIREDO, A. C. Geotecnologia e ecologia da paisagem no monitoramento da fragmentação florestal. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 23, n. 2, p. 201-210, 2016. doi: 10.1590/2179-8087.119814
- SANTOS, J. F. C.; MENDONÇA, B. A. F.; ARAÚJO, E. J. G.; ANDRADE, C. F. Fragmentação florestal na Mata Atlântica: o caso do município de Paraíba do Sul, RJ, Brasil. *Revista Brasileira de Biociências*, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 151-158, 2017.
- SANTOS, M. J.; DISNEY, M.; CHAVE, J. Detecting human presence and influence on neotropical forests with remote sensing. *Remote Sensing*, Basel, v. 10, n. 1593, p. 2-18, 2018. doi: 10.3390/rs10101593
- SILVA, S. F.; MENDES, N. G. S.; BERMUDEZ, W. L.; SANTOS, A. R.; GARCIA, G. O. Análise espacial dos fragmentos florestais da sub-bacia hidrográfica do Rio da Prata em Ibraçu e Aracruz – ES, Brasil. *Vértices*, Campos dos Goytacazes, v. 17, n. 1, p. 121-132, 2015. doi: 10.5935/1809-2667.20150008
- SOUZA, C. G.; ZANELLA, L.; BORÉM, R. A. T.; CARVALHO, L. M. T.; ALVES, R. H. M. VOLPATO, M. M. Análise da fragmentação florestal da área de proteção ambiental coqueiral, Coqueiral – MG. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 631-644, 2014. doi: 10.1590/1980-509820142403011
- TRIMBLE. *Ecognition Developer 9.0: software*. 2014. Disponível em: <http://www.ecognition.com/free-trial>. Acesso em: 17 set. 2018.
- USGS. *Portal do serviço geológico dos Estados Unidos*. 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em: 2 out. 2018.

Contribuição dos autores: Alexandre Leão Gonçalves conduziu as etapas da pesquisa, definiu as questões metodológicas, procedeu a aplicação e a interpretação das métricas de paisagem, além da escrita científica; Vanessa Maria Silva da Cruz fez a revisão bibliográfica, contribuiu com o tratamento digital de imagens e com a apresentação e discussão dos resultados; Anderson Borges Serra fez a orientação/supervisão geral do trabalho, auxiliou na revisão de literatura, realizou revisão ortográfica e gramatical da redação científica e as alterações finais na estrutura.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao geógrafo e mestrando em Geografia Alexandre Augusto Cardoso Lobato por todo apoio à realização desta pesquisa.

Fonte de financiamento: Não houve fonte de financiamento.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.