

## Análise da conectividade funcional em uma paisagem caracterizada pela expansão da cultura canavieira

Marjorie Mendes Guarengi<sup>1</sup>  
Arnaldo Walter<sup>1</sup>  
Michelle Cristina Araújo Picoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
13083-860 - Campinas - SP, Brasil  
{marjorie, awalter}@fem.unicamp.br  
mipicoli@gmail.com

**Abstract.** Landscape connectivity is fundamental to maintain the biodiversity in fragmented areas. Several metrics are used to evaluate landscape connectivity. However, metrics based on graph theory have been widely applied by integrating the connected habitat area that exists within the fragments (intrapatch connectivity) and connections between different fragments (interpatch connectivity) in a single index. Functional connectivity depends on permeability and heterogeneity of the matrix and, therefore, it can be modified by land use change. The expansion of agriculture has been an important impact factor on biodiversity. Sugarcane is the main crop in São Paulo state and its intense expansion can affect the connectivity due to the change on landscape configuration. The aim of this study was to evaluate the influence of sugarcane expansion on connectivity for medium and large mammals which require forest habitat in a portion of Novo Horizonte (SP), between 1995 and 2015. Circuit theory was used to estimate effective distance between fragments and to model connectivity in non-preferential areas for these animals. Graph theory was applied to quantify and assess the effect of land use change on landscape connectivity and also to prioritize areas for conservation using the probability of connectivity index. For the mammals groups evaluated, the resistance level of the matrix increase due to sugarcane expansion negatively impacting the species' dispersal. However, the landscape connectivity before the expansion of this crop was already low.

**Palavras-chave:** functional connectivity, graph theory, connectivity indexes, circuit theory, resistance distance, sugarcane, conectividade funcional, teoria dos grafos, índices de conectividade, teoria de circuitos, distância de resistência, cana-de-açúcar.

### 1. Introdução

A expansão agrícola é um dos principais fatores de impacto sobre a biodiversidade no país (Ferreira et al., 2012). Um dos grandes efeitos da modificação da configuração da paisagem devido a essa atividade corresponde à fragmentação de habitats naturais, que pode ocasionar não só a perda de habitat, mas também a redução da conectividade da paisagem e, conseqüentemente, o isolamento dos fragmentos (Pardini et al., 2010).

A conectividade consiste na capacidade, da paisagem, de facilitar ou impedir a movimentação das espécies entre manchas de vegetação (Taylor et al., 1993), e tem importante função na manutenção da biodiversidade em paisagens fragmentadas. Diversas métricas são utilizadas para avaliar a conectividade de uma paisagem. Porém, métricas baseadas na teoria dos grafos, como o índice de Probabilidade de Conectividade – PC, têm se destacado por integrar a quantidade de habitat conectado dentro de um fragmento (intra) com a conectividade entre manchas diferentes (inter) em uma única métrica (Saura e Pascual-Hortal, 2007; Saura e Rubio, 2010). O índice PC é aplicado não só para quantificar a conectividade da paisagem, como também identificar áreas prioritárias para restauração e conservação (Tambosi et al., 2014; Crouzeilles et al., 2014) e avaliar o efeito, sobre a conectividade, de mudanças antrópicas na paisagem (Gurrutxaga et al., 2011).

Na teoria dos grafos, a paisagem é representada por um conjunto de nós (manchas de habitat) e ligações (Urban e Keitt, 2001). As ligações são elementos não-habitat que representam a possibilidade de um organismo se dispersar entre duas manchas. Podem estar associadas a corredores ecológicos ou representarem a conectividade funcional definida em

termos de distância. A distância Euclidiana (em linha reta) pode ser assumida, porém o uso da distância efetiva (ou funcional, que considera a permeabilidade e heterogeneidade da matriz) é preferível (Saura e Rubio, 2010).

Um método comumente utilizado para a obtenção da distância funcional é o cálculo da distância de menor custo (*least-cost path analysis*), que considera um único caminho ótimo de movimentação de uma espécie entre dois nós (Gurrutxaga et al., 2011). No entanto, outra forma de cálculo é dada por meio da teoria dos circuitos (McRae et al., 2008; Avon e Bergès, 2016), a partir da qual as distâncias funcionais (neste caso, denominadas distâncias de resistência) são obtidas considerando simultaneamente todas as possíveis alternativas de dispersão do animal na paisagem, dado um mapa de superfície de resistência, o qual descreve a facilidade de movimentação dos organismos na paisagem.

Com base na teoria de circuitos, também é possível realizar análises de conectividade a partir dos mapas de corrente, segundo os quais podem ser identificadas áreas de maior ou menor contribuição para a conectividade entre as manchas de habitat, baseadas no fluxo de corrente (McRae et al., 2008). Os valores de cada pixel representam a quantidade de fluxo acumulado de corrente entre todos os pares de nós. A densidade dos fluxos de corrente pode ser utilizada para identificar potenciais corredores ecológicos (McRae et al., 2008).

A principal cultura agrícola do estado de São Paulo é a cana-de-açúcar, ocupando cerca de 65% das áreas plantadas com lavouras temporárias e permanentes no estado (IBGE, 2015). Considerando a intensa presença da cana-de-açúcar no território paulista e as mudanças nas paisagens ocorridas em virtude da expansão dessa cultura, o objetivo deste trabalho foi avaliar, em uma região específica, a influência dessa expansão sobre a conectividade para mamíferos de médio e grande porte de habitat florestal. Para tanto, a conectividade foi modelada pela teoria de circuitos e analisada por meio da teoria dos grafos a partir do índice de Probabilidade de Conectividade.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Área de Estudo e Mapeamento do Uso da Terra

A área de estudo selecionada corresponde a uma parcela com 13.250 ha do município paulista de Novo Horizonte, como mostram as Figuras 1(a) e 1(b), delimitada por rios e estradas. Caracterizada pela presença de grandes fragmentos de vegetação, a região é considerada de extrema alta importância quanto à biodiversidade (MMA, 2007) e está localizada no Bioma Mata Atlântica. A cana é a principal cultura agrícola da região, ocupando mais de 40% de sua área em 2015. Outras lavouras temporárias são plantadas no período de rotação da cana-de-açúcar, e culturas permanentes correspondem a cerca de 4% da região.

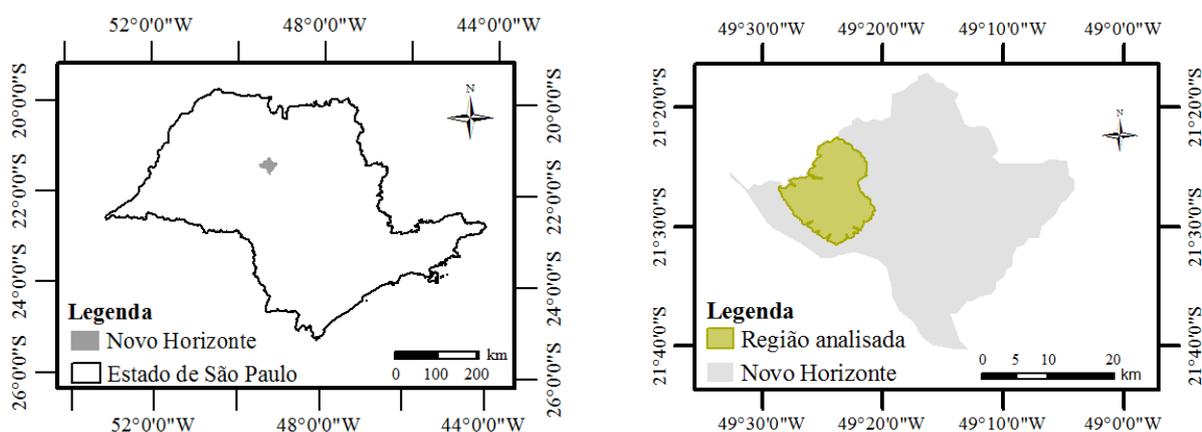


Figura 1. a) Localização do município paulista de Novo Horizonte; b) Região estudada.

Imagens dos satélites Landsat-5 (sensor TM) e Landsat-8 (sensor OLI) foram utilizadas para realizar o mapeamento do uso da terra da região, localizada na órbita-ponto 221/75. Os anos de 1995 e 2015 foram escolhidos para o mapeamento a fim de se observar sobre quais áreas ocorreu a expansão da atividade canavieira. Os polígonos das classes de uso foram delimitados pelo processo de segmentação das imagens por meio do software ENVI 5.1. As áreas foram classificadas manualmente, com o auxílio das imagens de satélite do Google Earth, sendo a classificação supervisionada pelo método da Máxima Verossimilhança aplicada para sanar possíveis dúvidas na interpretação. Cenas de diversos meses foram consideradas para realizar o mapeamento, sendo as principais datadas de 30/11/1994, 17/01/1995, 07/04/1995, 28/07/1995, 21/02/1996 (Landsat-5) e 02/09/2014, 24/01/2015, 30/04/2015 e 20/08/2015 (Landsat-8).

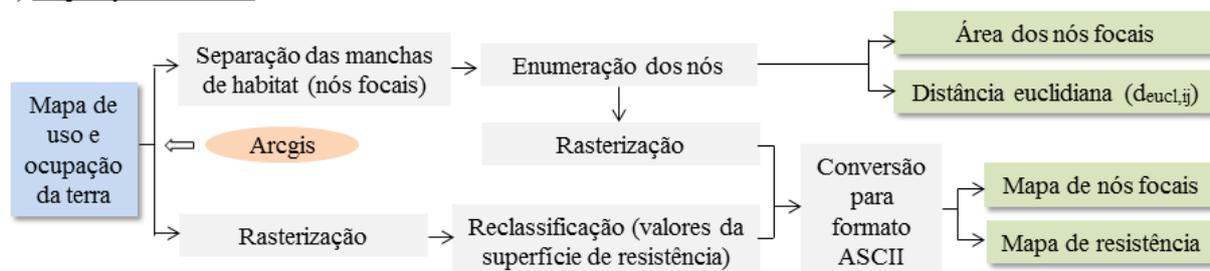
As classes de uso e ocupação da terra foram mapeadas em cana-de-açúcar, cultura temporária, cultura permanente, pastagem, reflorestamento, floresta, área úmida não florestada, corpo d'água e área construída.

## 2.2 Conectividade da Paisagem

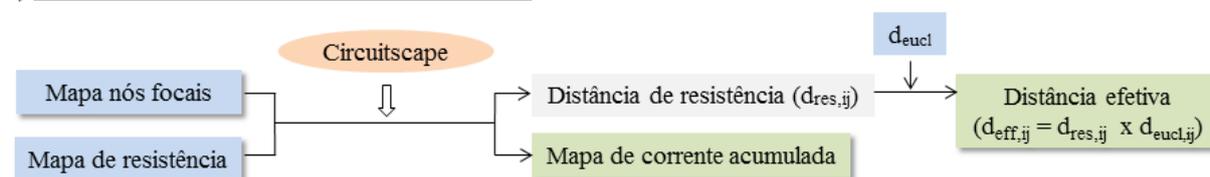
A avaliação da conectividade da área de estudo teve como enfoque médios e grandes mamíferos com requerimento de habitat florestal, considerando uma paisagem de alta heterogeneidade estrutural. A seleção desse grupo focal foi feita baseada em informações disponibilizadas em Santos (2014) sobre a permeabilidade da matriz para diferentes grupos focais. Para as espécies de habitat florestal, a cana representa alta resistência à movimentação desses animais frente a outros usos antrópicos, como a pastagem.

Como apresentado na Figura 2, a metodologia utilizada foi dividida em três etapas: 1) preparação dos dados; 2) cálculo da corrente acumulada e distância efetiva, e 3) cálculo do índice de Probabilidade de Conectividade.

### 1) Preparação dos dados



### 2) Cálculo da corrente acumulada e distância efetiva



### 3) Cálculo do índice de Probabilidade de Conectividade (PC)

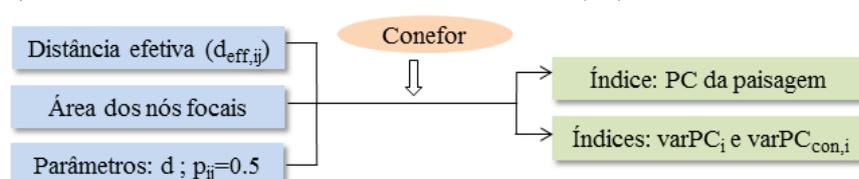


Figura 2. Fluxograma das três etapas e softwares (indicados nas elipses) utilizados para a modelagem e avaliação da conectividade na paisagem.

Primeiramente, os polígonos classificadas como floresta, considerados como nós focais, foram separados e numerados para cada ano. Foram calculadas as áreas de cada nó, a distância euclidiana ( $d_{eucl}$ ) entre os pares de nós, e os nós enumerados foram transformados em raster com resolução de 30 m.

Os mapas de uso da terra em cada ano foram rasterizados (resolução espacial de 30 m) e as classes foram reclassificadas de acordo com os valores da superfície de resistência indicados na Tabela 1, dando origem a um mapa de resistência. Os valores da superfície, baseados na habilidade de uso e movimentação das espécies na matriz, variaram de 1 a 100, sendo 1 para a classe mais permeável e 100 para a menos permeável.

Tanto os nós focais quanto o mapa de resistência foram convertidos de raster para o formato ASCII.

Tabela 1. Valores da superfície de resistência para grandes e médios mamíferos de habitat florestal.

Classe	Peso	Classe	Peso
Área construída	100	Pastagem	70
Corpo d'água	100	Reflorestamento	50
Cana-de-açúcar	90	Mata Atlântica	5
Cultura permanente	90	Área úmida não florestada	5
Cultura temporária	75		

Fonte: Adaptado de Santos (2014).

Dando início a segunda etapa, os mapas de nós focais e de resistência serviram de entrada para o software *Circuitscape 4.0* (McRae e Shah, 2013) a partir do qual foi obtido o mapa de corrente acumulada para cada ano, e calculada a distância de resistência para cada par de nós,  $d_{res,ij}$ , por meio da opção *Pairwise*. Para considerar tanto a influência dos diversos usos da terra na matriz, quanto a distância geográfica entre os pares de nós, as distâncias de resistência ( $d_{res,ij}$ ) foram multiplicadas pelas respectivas distâncias euclidianas ( $d_{eucl,ij}$ ), obtendo-se assim a distância efetiva entre cada par de nós,  $d_{eff,ij}$  (Metzger e Décamps, 1997).

Na terceira etapa, a abordagem da teoria dos grafos foi aplicada para avaliar a conectividade por meio do cálculo do índice de Probabilidade de Conectividade - PC (Saura e Pascual-Hortal, 2007; Saura e Rubio, 2010) para toda a paisagem, em 1995 e 2015, utilizando o software *Conefor Sensinode 2.6* (Saura e Torne, 2009). O índice PC indica a probabilidade de existir conexão funcional entre pares de nós e varia entre 0 (menor conectividade; nós não estão conectados um ao outro) e 1 (maior conectividade; quando toda a paisagem é ocupada pelo habitat adequado).

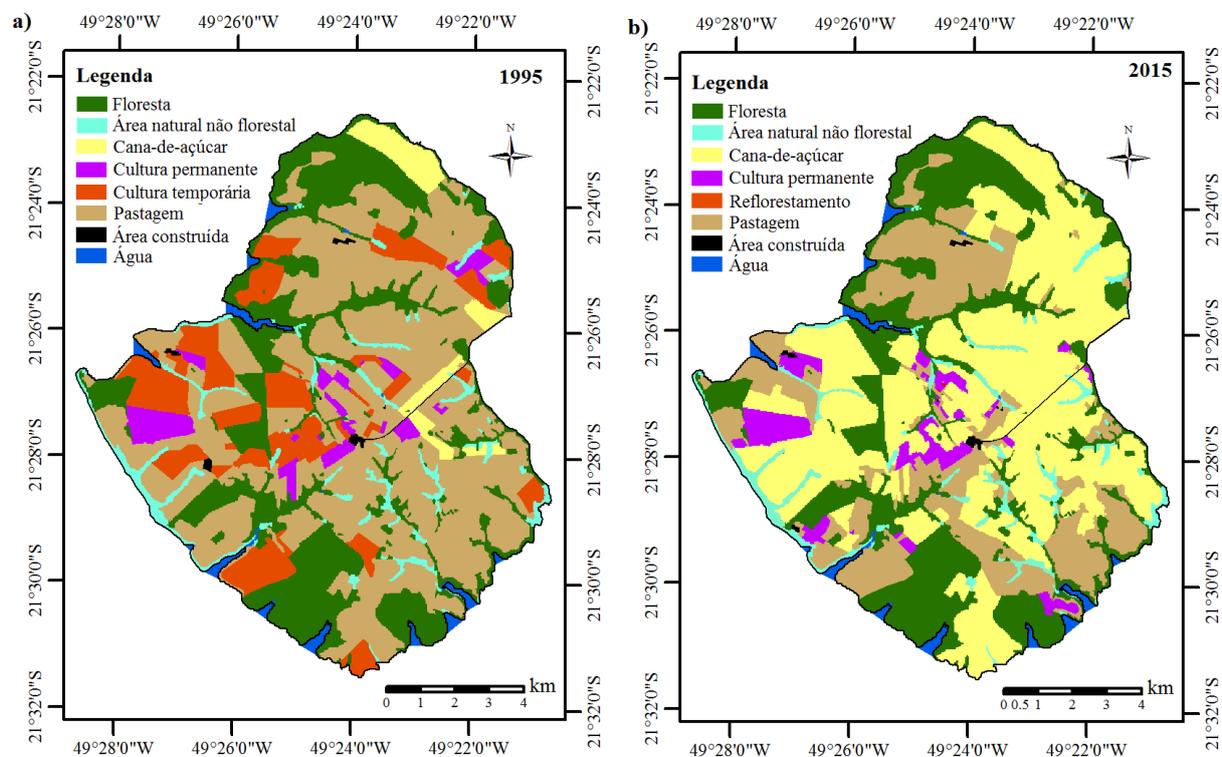
Além do PC, outros dois índices foram obtidos pelo *Conefor*: (i)  $varPC_i$  - representa a importância de cada fragmento para a paisagem, considerando a área dos nós e se esses estão conectados; e (ii)  $varPC_{con,i}$  - indica a importância do nó como conector, levando em conta apenas sua posição topográfica e as características dos demais nós conectados por esse nó, sem considerar seu atributo em termos de área (Saura e Rubio, 2010).

Para o cálculo de PC,  $varPC_i$  e  $varPC_{con,i}$  foram utilizados a área em metros de cada nó focal e a distância efetiva ( $d_{eff,ij}$ ) entre todas as combinações de pares de nós. Além disso, o *Conefor* requer como parâmetro de entrada a capacidade de dispersão dos animais a partir da qual será definida a existência de conexões entre os nós. As informações sobre a capacidade de dispersão de espécies são escassas e, portanto, os índices foram obtidos para espécies hipotéticas de capacidade de dispersão média de 500 m, 1000 m e 3000 m (Crouzeilles et al., 2014). Baseado em Gurrutxaga et al. (2011), o parâmetro da distância de dispersão ( $d$ ) foi dado em termos de custo acumulado de movimento (ou seja, capacidade efetiva da espécie de se deslocar considerando a permeabilidade da matriz). Para tanto, as distâncias de 500 m,

1000 m e 3000 m foram multiplicadas pelo valor médio da superfície de resistência (50) e o resultado determinou a distância de dispersão em termos de custo acumulado, associada a uma probabilidade direta de dispersão de 0.5 entre os fragmentos,  $p_{ij}$  (Gurrutxaga et al., 2011).

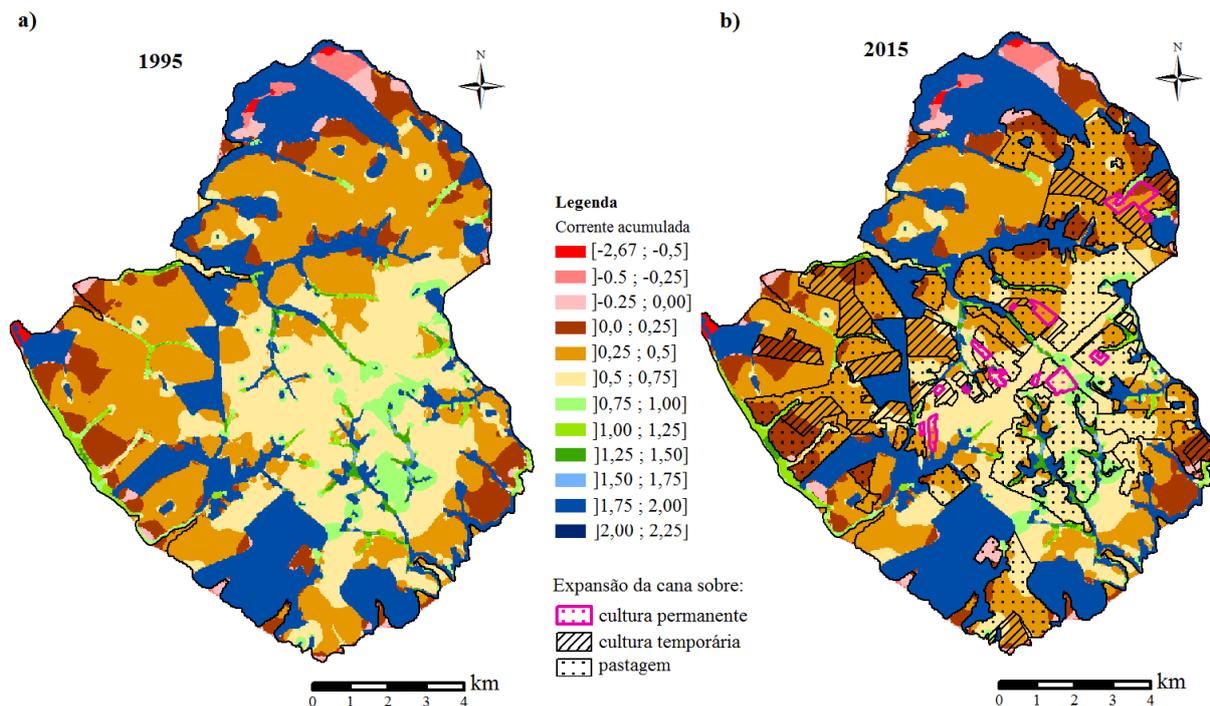
### 3. Resultados e Discussão

As Figuras 3(a) e 3(b) mostram a classificação do uso e ocupação da terra para os anos de 1995 e 2015, respectivamente. No período analisado, a cana expandiu por cerca de 40% da região, ocupando 5.630 ha em 2015. De acordo com as figuras, observa-se que o plantio da cana-de-açúcar, em 2015, ocorreu em locais antes destinados predominantemente à pastagem e às culturas anuais, as quais sofreram redução de 26% e 13%, respectivamente. A vegetação remanescente não sofreu alteração em termos de área e ocupava, em 2015, cerca de 25% do total da paisagem.



Figuras 3(a) e 3(b). Mapas de uso e ocupação da terra em 1995 e 2015, respectivamente.

Os mapas de corrente acumulada considerando os usos da terra em 1995 e 2015 são apresentados nas Figuras 4(a) e 4(b). A escala logarítmica ( $\log_{10}$ ) foi adotada a fim de facilitar a visualização dos resultados (McRae e Shah, 2013). As áreas com maior densidade de corrente e, portanto, com maior probabilidade de movimentação de acordo com a teoria de circuitos, correspondem às próprias manchas de vegetação, seguidas das áreas úmidas não florestadas, devido ao baixo nível de resistência à dispersão para essas classes (Tabela 1). As demais áreas já apresentavam baixa facilidade à dispersão das espécies simuladas em 1995. De forma geral, são observados aumento das áreas cujo  $\log_{10}$  das correntes variou entre 0 e 0.5 (região central e sudoeste), e redução das áreas com variação entre 0.5 e 1 (porção central). Embora o peso da superfície de resistência atribuído à cana de açúcar (90) seja maior que os valores atribuídos aos usos sobre os quais ocorreu sua expansão (cultura temporária, 75, e pastagem, 70), as probabilidades de conectividade não sofreram alterações significativas entre os dois anos.



Figuras 4(a) e 4(b). Mapa da corrente acumulada (escala logarítmica) para mamíferos de médio e grande porte de habitat florestal, em 1995 e 2015, respectivamente.

Tabela 2. Índices de Probabilidade de Conectividade para as espécies simuladas.

Capacidade de dispersão (m)	1995	2015
500	0.0304	0.0291
1000	0.0413	0.0400
3000	0.0533	0.0525

De acordo com a abordagem da teoria dos grafos, os índices PC apresentaram baixos valores em ambos os anos analisados, para as três capacidades de dispersão consideradas. Os resultados próximos de zero indicam que os fragmentos de vegetação praticamente não possuem conexão entre si para mamíferos de médio e grande porte de habitat florestal.

A redução dos valores de PC em 2015 está relacionada com a ampliação das áreas com cana-de-açúcar durante o período, visto que, além de o peso da superfície de resistência para a cana ser maior frente à pastagem e às culturas temporárias, a expansão canavieira ocorreu inclusive entre fragmentos de vegetação remanescente, dificultando ainda mais a movimentação das espécies entre eles.

A Figura 5(a) exemplifica a variação percentual da importância de cada fragmento ( $\text{varPC}_i$ ) entre 1995 e 2015 para animais com capacidade de dispersão de 1000 m. Variações positivas indicam índices menores em 2015, e variações negativas indicam aumento da importância do nó para a conectividade funcional em 2015. Em geral, todos os fragmentos perderam importância durante o período avaliado. Considerando que não houve alteração nas áreas dos fragmentos de um ano para outro, a redução do índice  $\text{varPC}_i$  se deve ao aumento da resistência ao movimento das espécies na matriz com a expansão da cana.

Os nós com maior contribuição como conectores para a paisagem ( $\text{varPC}_{i,\text{con}}$ ) em 2015, considerando capacidade de dispersão de 1000 m, são apresentados na Figura 5(b). De acordo com sua posição geográfica, os fragmentos localizados na região central e sul são indicados como de maior importância, facilitando a movimentação animal entre as manchas de vegetação do norte e as da região sul da paisagem. Observa-se que a expansão canavieira

também influencia a relevância da parcela conectora dos fragmentos. Os nós de maior importância, indicados nas tonalidades de verde e azul, quando não estão fisicamente mais próximos um do outro, apresentam caminhos alternativos entre si (fragmentos em verde e azul da porção centro-sul). Por fim, a conservação dos nós com maior valor de  $varPC_{i,con}$  é de grande relevância para manutenção da paisagem como um todo.

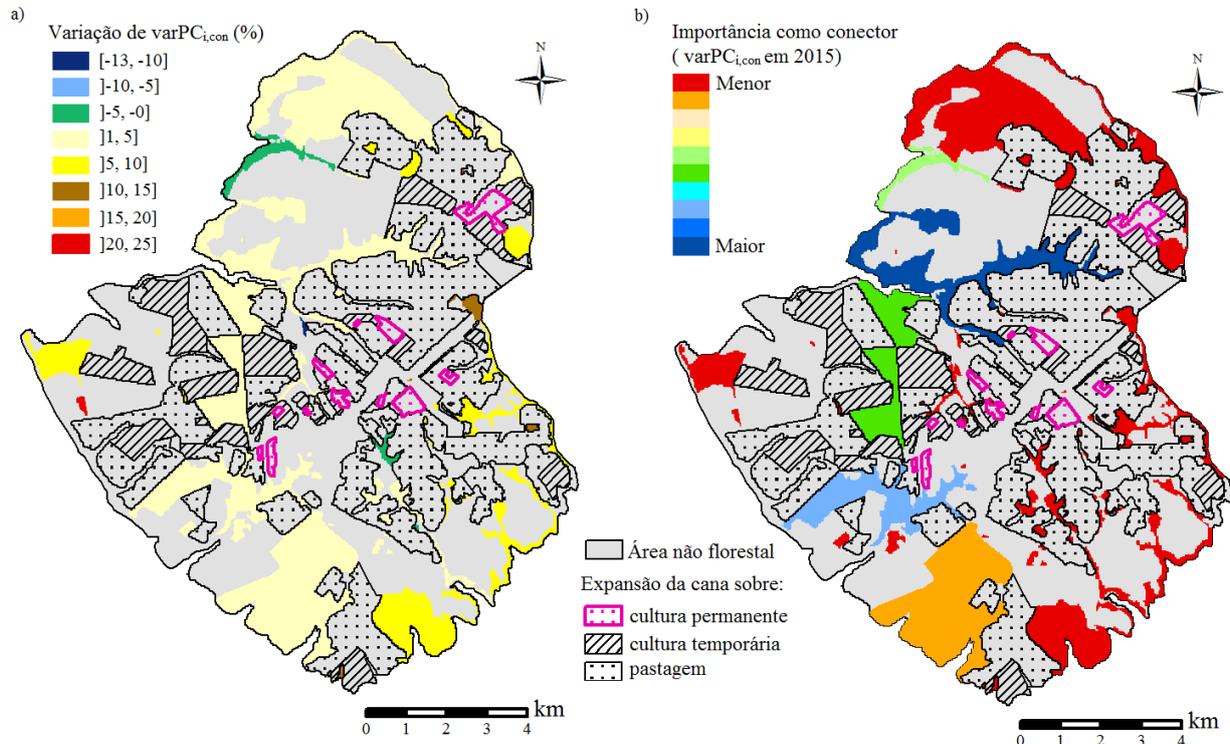


Figura 5. a) Variação da perda de importância individual dos nós para toda a paisagem entre 1995 e 2015; b) Importância dos nós como conectores ( $varPC_{i,con}$ ) em 2015. Em ambos os mapas é considerada capacidade de dispersão de 1000 m.

#### 4. Conclusões

Mapas e índices obtidos a partir das teorias de circuitos e gráficos podem fornecer diversas informações sobre a distribuição da conectividade em uma paisagem, seja mostrando se as mudanças no uso da terra impactaram a movimentação das espécies entre manchas de vegetação, como também indicando quais fragmentos contribuem mais para a manutenção da conectividade na paisagem. Os resultados dependem não só da proximidade física entre os fragmentos, como também das preferências dos animais por cada uso da terra, além da região analisada.

Para grupos funcionais de médios e grandes mamíferos na região avaliada, a expansão da cana-de-açúcar acarretou redução na conectividade entre 1995 e 2015, visto que a cana representa maior resistência ao movimento frente à pastagem e lavouras temporárias, usos sobre as quais se deu a expansão desta cultura. Porém, observou-se também que a conectividade em 1995 já apresentava índices muito baixos. Para outros animais, com habitat preferencial diferente do analisado, os resultados da configuração da distribuição da conectividade da paisagem podem ser distintos dos observados, embora para a mesma região e para a mesma mudança de uso da terra.

## Referências Bibliográficas

- Avon, C.; Bergès, L. Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances. **Landscape Ecology**, v. 31, n.7, p.1551-1565, 2016.
- Ayram, C. A. C.; Mendoza, M. E.; Salicrup, D. R. P.; Granados, E. L. Identifying potential conservation areas in the Cuitzeo Lake basin, Mexico by multitemporal analysis of landscape connectivity. **Journal for Nature Conservation**, v. 22, n. 5, p. 424-435, 2014.
- Crouzeilles, R.; Prevedello, J. A.; Figueiredo, M. D. S. L.; Lorini, M. L.; Grelle, C. E. V. The effects of the number, size and isolation of patches along a gradient of native vegetation cover: how can we increment habitat availability?. **Landscape ecology**, v. 29, n.3, p. 479-489, 2014.
- Ferreira, J.; Pardini, R.; Metzger, J. P.; Fonseca, C. R.; Pompeu, P. S.; Sparovek, G.; Louzada, J. Towards environmentally sustainable agriculture in Brazil: challenges and opportunities for applied ecological research. **Journal of Applied Ecology**, v. 49, p. 535-541, 2012.
- Gurrutxaga, M.; Rubio, L.; Saura, S. Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: A transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). **Landscape and Urban Planning**, v. 101, n. 4, p. 310-320, 2011.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Base de Dados Agregados: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2015. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso: out. 2016.
- McRae, B. H.; Shah, V. B. **Circuitscape User Guide**. Santa Barbara: The University of California, 2013. Disponível em: < <http://www.circuitscape.org> >.
- McRae, B. H.; Dickson, B. G.; Keitt, T. H.; Shah, V. B. Using circuit theory to model connectivity in ecology and conservation. **Ecology**, v. 10, p. 2712–2724, 2008.
- Metzger, J. P.; Décamps, H. The structural connectivity threshold: an hypothesis in conservation biology at the landscape scale. **Acta Oecologica**, v. 18, n. 1, p.1-12, 1997.
- Pardini, R.; Bueno, A. de A., Gardner, T. A.; Prado, P. I.; Metzger, J. P. Beyond the fragmentation threshold hypothesis: regime shifts in biodiversity across fragmented landscapes. **PLoS One**, v. 5, n. 10, e13666 , 2010.
- Santos, J. S. dos. **Influência da permeabilidade da matriz e da heterogeneidade da paisagem na conservação da biodiversidade de mamíferos terrestres**, 2014. 110 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2014
- Saura, S.; Pascual-Hortal, L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. **Landscape Urban Plan**, v. 83, p. 91–103, 2007.
- Saura, S.; Rubio, L. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. **Ecography**, v. 33, p. 523- 537, 2010.
- Saura, S.; Torné, J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. **Environmental Modelling & Software**, v. 24, p. 135-139, 2009.
- Taylor, P. D.; Fahrig, L.; Henein, K.; Merriam, G. Connectivity is a vital element of landscape structure. **Oikos**, v. 68, n. 3, p. 571–573, 1993.
- Urban, D.; Keitt, T. Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. **Ecology**, v. 82, n.5, p. 1205- 1218, 2001.