

# MODELAGEM DA EXPANSÃO DO REFLORESTAMENTO COM EUCALIPTO E EFEITOS NA ESTRUTURA DA PAISAGEM

<https://doi.org/10.4215/rm2019.e18019>

Carlos Henrique Pires Luiz <sup>a\*</sup> - Sergio Donizete Faria <sup>b</sup> - Maria Isabel Escada <sup>c</sup>

(a) Doutorando em Geografia. Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2317-0593>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/2207907462621772>.

(b) Dr. em Computação. Professor Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), Brasil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2347-1051>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/4291462690681682>.

(c) Dr. em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, São José dos Campos (SP), Brazil.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5822-8265>. **LATTES:** <http://lattes.cnpq.br/9947670889009026>.

## Article history:

Received 3 may, 2019  
Accepted 5 September, 2019  
Publisher 15 September, 2019

## (\*) CORRESPONDING AUTHOR

**Address:** UFMG, Instituto de Geociências, Av. Antônio Carlos, 6.627 – CEP 31.270-901 - Belo Horizonte (MG), Brasil. Tel. : (+ 55 31) 3409-5427

**E-mail:** Email: [cpiresluiz@gmail.com](mailto:cpiresluiz@gmail.com)

## Resumo

Neste artigo trabalhamos uma metodologia combinada de sensoriamento remoto, modelagem ambiental e ecologia da paisagem para análise dos impactos da expansão do reflorestamento com eucalipto na estrutura da paisagem. O uso combinado dessas técnicas possibilitou a simulação de cenários futuros, utilizando-os não apenas como uma ferramenta de análise, mas, sobretudo, para auxiliar no planejamento. O trabalho teve como área de estudo os municípios da Bacia do Rio Piracicaba e da Região Metropolitana do Vale do Aço, região que abriga importantes indústrias do setor siderúrgico, de papel e celulose em Minas Gerais. Foram utilizados dados da cobertura da terra obtidos a partir de classificações de imagens de satélite (TM/Landsat) para os anos de 1985, 2010 e 2013. Em conjunto à cobertura da terra foram exploradas diversas fontes de variáveis estimuladoras e restritivas à mudança para criação de um modelo de cobertura da terra capaz de simular a expansão das áreas de eucalipto considerando um cenário de manutenção da tendência de crescimento observada entre 1985 e 2010. Os resultados do mapeamento mostraram que entre 1985 e 2010 houve aumento de cerca de 12% nas áreas de reflorestamento com Eucalipto, ao passo que as áreas de floresta diminuíram aproximadamente 9% e as de pastagem 3%.

**Palavras-chave:** Detecção de mudança, Simulação, Ecologia da Paisagem.

## Abstract / Resumen

### MODELLING APPROACH FOR PREDICTING LANDSCAPE CHANGES IN EXPANDING EUCALYPTUS PLANTATIONS IN BRAZIL

This paper combines remote sensing, environmental modeling, and landscape ecology to investigate the impacts of the expansion of eucalyptus reforestation. Using these techniques, a methodology was developed to analyze and predict future land cover and landscape structure trends. The study area was comprised of the river basin municipalities in Rio Piracicaba and the metropolitan region of Vale do Aço (RMVA), a region that is home to large steel, paper, and cellulose industries in Minas Gerais. This major hub of economic development in the state has altered the landscape through deforesting native vegetation and planting eucalyptus trees. Land cover data were taken from satellite image classifications (TM/Landsat) from 1985, 2010 and 2013 in order to study the land cover changes. A number of variables that stimulate or restrict these alterations and the eucalyptus expansion observed between 1985 and 2010 were used to simulate the eucalyptus expansion, through Multi-Layer Perception Neural Networking. The results showed that the areas of Eucalyptus reforestation increased by about 12% between 1985 and 2010, whereas forest areas contracted by approximately 9%, and pasture by 3%. The simulated eucalyptus expansion indicated that by 2035 the structure of the landscape will have changed, with an increased level of isolation of the forest patches and a decrease in their nuclear area.

**Keywords:** Land Change Modeler, Analysis of change, Simulation, Landscape ecology.

### MODELADO DE EXPANSIÓN DE REFORESTACIÓN DE EUCALIPTO Y EFECTOS SOBRE LA ESTRUCTURA DEL PAISAJE

En este artículo trabajamos una metodología combinada de teledetección, modelado ambiental y ecología del paisaje para analizar los impactos de la expansión de la reforestación con eucalipto en la estructura del paisaje. El uso combinado de estas técnicas permitió la simulación de escenarios futuros, utilizándolos no sólo como una herramienta de análisis, sino, sobre todo, para auxiliar en la planificación. El trabajo tuvo como área de estudio los municipios de la Cuenca del Río Piracicaba y de la Región Metropolitana del Valle del Acero, región que alberga importantes industrias del sector siderúrgico, de papel y celulosa en Minas Gerais. Se utilizaron datos de la cobertura de la tierra obtenidos a partir de clasificaciones de imágenes satelitales (TM / landsat) para los años 1985, 2010 y 2013. En conjunto con la cobertura de la tierra se exploraron diversas fuentes de variables estimuladoras y restrictivas al cambio a la creación de un modelo de cobertura de la tierra capaz de simular la expansión de las áreas de eucalipto considerando un escenario de mantenimiento de la tendencia de crecimiento observada entre 1985 y 2010. Los resultados del mapeamiento mostraron que entre 1985 y 2010 hubo aumento de cerca del 12% en las áreas de reforestación con Eucalipto, mientras que las áreas de bosque disminuyeron aproximadamente 9% y las de pastoreo 3%.

**Palabras-clave:** Land Change Modeler, Detecção de cambios, Simulación, Ecología del paisaje.

This is an open access article under the CC BY Creative Commons license

Copyright © 2019, Universidade Federal do Ceará

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um pólo industrial a partir da década de 1940, com empresas do setor siderúrgico, mineração, papel e celulose, nos municípios que compõem a Região Metropolitana do Vale do Aço – RMVA e Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, Brasil, criou uma forte demanda por carvão vegetal e celulose. Essa demanda resultou na supressão de áreas de floresta nativa, do bioma Mata Atlântica, e no aumento de áreas de reflorestamento com eucalipto, que servem de matéria prima na fabricação desses produtos.

Em sua formação original, as formações florestais do bioma Mata Atlântica ocupavam a costa leste, sudeste e sul do Brasil, totalizando uma área de 1,3 milhão de km<sup>2</sup>, equivalente a 15% do território brasileiro. Atualmente, restam 12,4 % de fragmentos florestais desse bioma (Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, 2017).

A supressão da vegetação da Mata Atlântica teve início na colonização do Brasil e se expandiu e intensificou a cada novo ciclo econômico que ocorreu na região. Mais recentemente, a partir de 1985 observou-se uma progressiva tendência de queda nas taxas de desmatamento (Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, 2017). De acordo com o Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica de 2015-2016, Minas Gerais, apresentou taxas de desmatamento anual na ordem de 7.000 ha, o que representa 24% do total desmatado nos 17 estados a comporem o Bioma, cuja taxa anual de desmatamento foi de 29.075 ha (Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, 2017).

Entre 2002 e 2014, observa-se no Brasil uma tendência de expansão do reflorestamento com eucalipto, que ocorreu paralelamente ao aumento da produção de celulose, tendo passado neste período de 8,0 para 16,4 milhões de toneladas/ano, enquanto a produção de papel passou de 7,8 para 10,3 milhões de toneladas/ano e a produção de carvão vegetal se manteve estável entre 17,6 e 17,8 milhões de toneladas/ano, de acordo com os dados da Associação Brasileira de Florestas Plantadas – ABRAF (ABRAF, 2015). De acordo com os dados do anuário estatístico dessa associação, o Estado de Minas Gerais é o que possui a maior área plantada de eucalipto do país, contando com 1.438.971 ha, o que representa 28,20% de toda a área plantada no Brasil (ABRAF, 2012). Nesse estado, a expansão do reflorestamento com eucalipto impacta os municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da Região Metropolitana do Vale do Aço – RMVA, onde estão concentradas grandes áreas desse reflorestamento. Analisando comparativamente a cobertura da terra na região, entre os anos de 1985 e 2010, observa-se a expansão das áreas de eucalipto e a supressão da vegetação nativa, o que provoca mudanças na estrutura da paisagem (LUIZ et al, 2016).

Com o intuito de entender melhor as mudanças na cobertura da terra e suas consequências na fragmentação da estrutura da paisagem ao longo do tempo – nos municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA, este trabalho visa analisar as mudanças provocadas pela expansão do reflorestamento com eucalipto a partir de uma abordagem que envolve o uso integrado de produtos e técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento, modelagem de mudanças na cobertura da terra e análise da estrutura da paisagem. O uso combinado dessas técnicas possibilita detectar mudanças da cobertura da terra, simular e projetar cenários futuros dessa cobertura, e realizar análises da estrutura das paisagem real e simulada, o que auxilia no monitoramento de processos ecológicos, como o aumento do isolamento das manchas de vegetação nativa e da fragmentação da paisagem.

A modelagem e a simulação de mudanças na cobertura da terra podem ser feitas através da construção de modelos do tipo *Land Use and Cover Change* – LUCC, que possibilitam avaliar os efeitos das mudanças na estrutura da paisagem. O *Land Change Modeler* – LCM (CLARCK LABS, 2009), adotado no presente trabalho, é uma ferramenta computacional utilizada para a criação de modelos baseados em *Multi Layer Perceptron Neural Network* – MLPNN. O LCM permite a construção de modelos capazes de estimar a probabilidade de mudança por meio da análise de transições de classes de cobertura da terra, para um determinado período de tempo, levando em consideração a interação das mudanças com dois grupos de determinantes espaciais, representados por variáveis que estimulam ou restringem essa dinâmica. O resultado dessa interação é uma superfície de probabilidade de mudanças, gerada a partir do peso atribuído às variáveis explicativas na alocação espacial das mudanças da cobertura da terra. Alguns exemplos de aplicações do LCM são encontrados em alguns trabalhos como o de Johnson (2009) que analisou os impactos da mudança da cobertura da terra para o período 1938–2001 para o refúgio da vida silvestre Crab Orchard, localizado em Illinois – Estados Unidos. Nesse estudo o

autor mostrou que a utilização de modelos computacionais ecológicos somada a análise da estrutura da paisagem, permite um diagnóstico mais completo dos impactos da mudança da cobertura da terra para a biodiversidade. Schulz et al (2010) investigaram as mudanças na cobertura da terra na região central do Chile, onde houve uma grande perda da vegetação natural. O estudo baseou-se na análise comparativa de imagens de satélite do período 1975–2008 e os resultados apontam para impactos irreversíveis para biodiversidade e empobrecimento da oferta de serviços ecológicos. Islam e Ahmed (2011) utilizaram o LCM para construção de um modelo para análise das mudanças da cobertura da terra na cidade de Dhaka – Bangladesh. Com base na análise de dados para o período 1991–2008 foram simulados dois cenários de mudança 2020 e 2050, em ambos foram identificados diversos aspectos negativos do crescimento desordenado da cidade, devido a urbanização não planejada. No Brasil, Salmona (2013) estudou o impacto das mudanças da cobertura da terra para o bioma cerrado. Foram explorados três cenários: um cenário de conservação das áreas de cerrado, um cenário de intensificação do desmatamento e outro de manutenção das taxas de desmatamento. Os resultados mostraram que em todos os cenários é essencial a definição de políticas públicas que conciliem o desenvolvimento e a conservação para a manutenção dos serviços ecossistêmicos providos por esta. Rahman et al (2015) estudaram os impactos das mudanças da cobertura da terra e climáticas na bacia hidrográfica do Rio Reno – Suíça. Nessa abordagem foram utilizados de forma conjunta modelos de mudança de cobertura da terra, hidrológicos e climáticos. O resultado mostrou que os efeitos combinados das mudanças detectadas sugerem uma redução de fluxo de pico e de vazão do rio analisado ao longo do tempo.

Para analisar e avaliar de forma quantitativa as transformações na estrutura e arranjo espacial das paisagens, indicando, por exemplo, mudanças no grau de isolamento, fragmentação e no tamanho das áreas núcleos dos remanescentes florestais, a partir de dados de mapeamento de cobertura da terra e de simulações e projeções por modelos LUCC dessa cobertura, pode-se utilizar métricas de paisagem (número de manchas, área núcleo, área e grau de isolamento). Essas métricas são utilizadas para auxiliar na interpretação das mudanças de padrões e na análise e caracterização dos elementos que compõem a paisagem (mancha, corredor e matriz). Essa abordagem foi adotada em trabalhos como de Wang et al (2014) que utilizaram métricas para avaliação de mudanças na estrutura da paisagem simulada e mapeada no Canadá; Reno et al (2016) e de Grecchi et al (2017) também utilizaram métricas da paisagem para a avaliação padrões de mudanças da cobertura florestal na Amazônia.

No presente trabalho é apresentada uma abordagem metodológica que visa analisar, mensurar e modelar o processo de substituição da cobertura vegetal nativa por eucalipto, tendo como área de estudo os municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA. Essa abordagem metodológica tem como base o uso de imagens TM/Landsat para os anos de 1985, 2010 e 2013, para o mapeamento da cobertura da terra. Os dados desse mapeamento são utilizados para a avaliação de mudanças de cobertura da terra no LCM, no qual um modelo de mudanças é construído e utilizado para projetar um cenário de expansão das áreas de reflorestamento com eucalipto. Esse cenário é proposto baseado na observação de que já contínuo avanço dessa cultura na região em decorrência da demanda por eucaliptos para abastecimento das indústrias siderúrgicas, de papel e de celulose, e na suposição de que a demanda continuará crescendo no mesmo ritmo do período de análise (1985-2010). Com base nesses pressupostos é simulada a cobertura da terra para o ano 2035. A estrutura da paisagem mapeada e simulada é avaliada comparativamente por meio das métricas de paisagem que indicam mudanças potenciais na estrutura da paisagem e suas implicações para a conservação ao longo do tempo.

O trabalho foi organizado a partir de um conjunto de análises para geração de um diagnóstico e de um prognóstico das mudanças da cobertura da terra nessa região, a partir de uma abordagem metodológica que combina o uso de dados de sensoriamento remoto para detecção de mudanças, modelos estatísticos e de simulação para análise das mudanças da cobertura da terra e métricas de paisagem. Para isso, no primeiro momento o enfoque do trabalho está na caracterização da área de estudo, que mostra como se deu sua ocupação da terra na região, indicando os principais elementos condicionadores de mudanças na cobertura da terra. Após essa caracterização é apresentada a metodologia que envolve a geração de mapas de uso e cobertura da terra e processos de modelagem. Os resultados mostram que a abordagem metodológica desenvolvida pode ser aplicada para outros estudos que tem como foco as mudanças na cobertura da terra. Porém, a principal contribuição deste trabalho foi explorar cenários relativos a expansão do eucalipto, observando limiares e os impactos que essa expansão podem provocar na estrutura da paisagem.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho são os municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da Região Metropolitana do Vale do Aço – RMVA, mostrada no mapa de localização da **Figura 1**, a qual coincide parcialmente com a região do Quadrilátero Ferrífero.

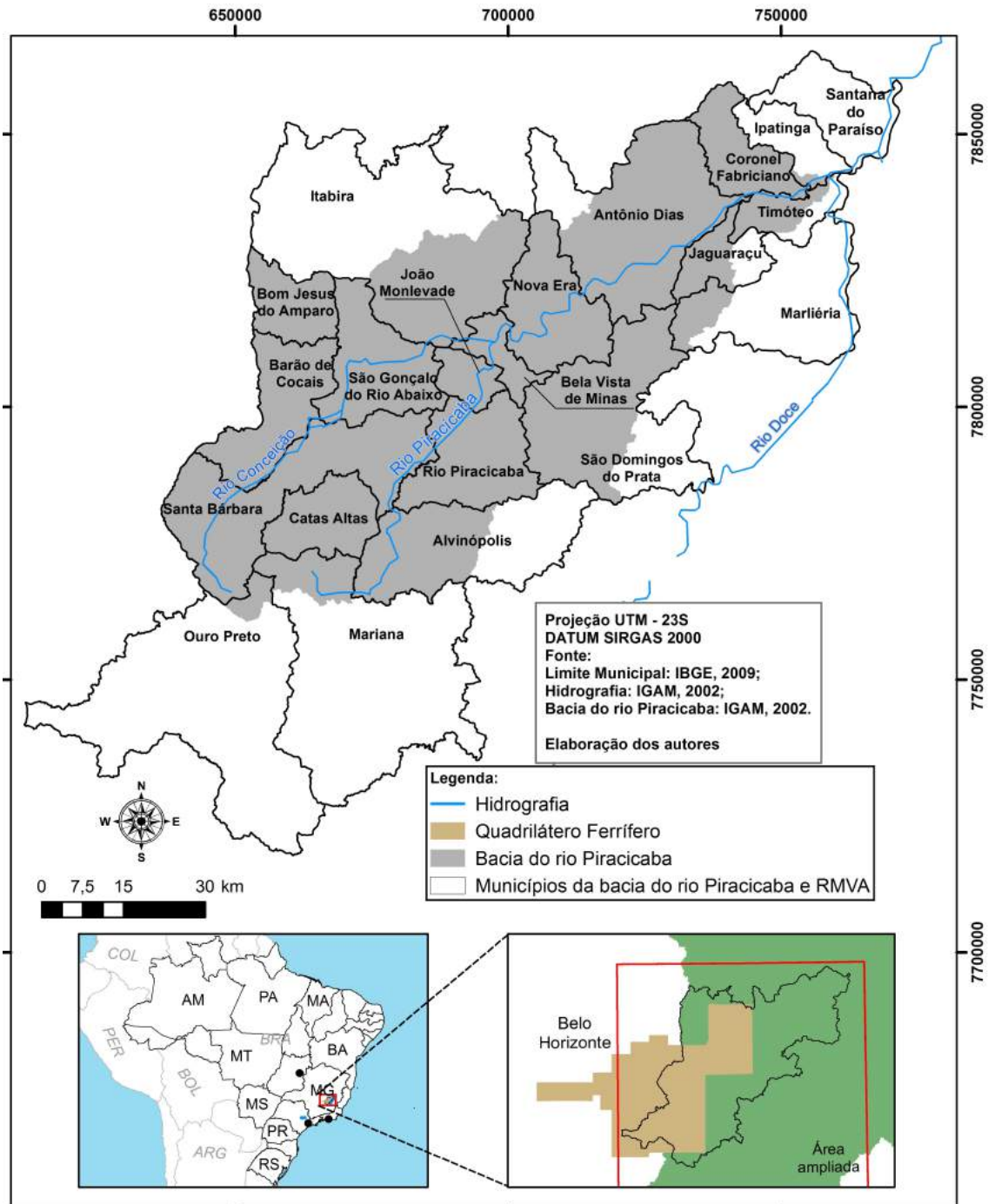


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

A ocupação territorial dessa área ocorre desde o período colonial, no século XVII, com o Ciclo do Ouro, quando iniciaram as atividades ligadas à mineração e a agropecuária, sobretudo as extensas áreas de pastagem dedicadas à criação do gado. Contudo, as mudanças na cobertura vegetal foram intensificadas no início do século XX, com a construção de infraestrutura viária e com a chegada de indústrias do setor siderúrgico, do setor minerário, de papel e de celulose. A partir da chegada dessas indústrias, inicia-se um processo efetivo da conversão de áreas de pastagem em reflorestamento com

eucalipto e da supressão da mata nativa, que em um primeiro momento serviu de combustível para os fornos das indústrias siderúrgicas. Com a chegada dessas indústrias houve um maior crescimento da população, e a expansão não planejada das áreas urbanas. Segundo dados do censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a população da área de estudo saltou de 613.662 habitantes em 1980 para 926.861 habitantes em 2010, o que representou um acréscimo de 33,79% no período de 30 anos.

O percentual médio do PIB baseado na indústria passou de 33,43%, em 1999, para 44,95%, em 2010; entretanto, o percentual médio da participação do setor agropecuário no PIB passou de 8,69% para 4,89%, nesse mesmo período. Esses dados mostram o crescimento das atividades do setor industrial e diminuição das atividades do setor agropecuário na composição do PIB da região. Houve, ainda, um aumento expressivo da produção anual de celulose, passando de 131.545 m<sup>3</sup>, em 1990, para 1.409.613 m<sup>3</sup>, em 2010, enquanto que a produção de carvão vegetal se mantém estável há alguns anos, em torno de 50.000 toneladas/ano (IBGE, 2014).

Na paisagem atual as coberturas da terra predominantes são: pastagem, reflorestamento com eucalipto e floresta, como pode ser observado nos registros fotográficos da **Figura 2**, obtidos durante trabalho de campo em 2013.



Figura 2 – Coberturas da terra mais representativas na área de estudo.

Na área de estudo existem algumas unidades de conservação de Proteção Integral e de Uso Sustentável, instituídas com base na legislação vigente – Lei Federal 9.985 (Brasil, 2000). Enquanto a primeira estabelece um uso dos recursos naturais restritos às atividades de pesquisa científica e turismo ecológico, nas unidades de conservação de uso sustentável é permitido que sua utilização para habitação, instalação de indústrias, =e/ou para quaisquer atividades econômicas de comprovado interesse social.

## METODOLOGIA

### *Mapeamento da cobertura da terra*

Para o mapeamento da cobertura da terra, para as três datas, foram utilizadas as imagens do Landsat apresentadas na **Tabela 1**.

Satélite/Sensor	Órbita/Ponto	Data
LANDSAT 5/TM	217/73 e 217/74	04/07/1985
LANDSAT 5/TM	218/73 e 218/74	25/06/1985
LANDSAT 5/TM	217/73 e 217/74	26/08/2010
LANDSAT 5/TM	218/71 e 218/74	01/08/2010
LANDSAT 8/TIRS	217/73 e 217/74	02/08/2013
LANDSAT 8/TIRS	217/73 e 217/74	25/08/2013

Tabela 1- Imagens utilizadas no mapeamento da cobertura da terra

Essas imagens foram georreferenciadas com base em imagens, de 2010, do satélite RapidEye e normalizadas segundo método do objeto escuro, conforme descrito por Chavez (1988).

Foram definidas as seguintes classes de cobertura da terra para o mapeamento: Água, Pastagem, Solo Exposto, Área Urbana, Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM), Reflorestamento com Eucalipto, Vegetação Campestre Natural, Afloramento Rochoso e Mineração. A partir da definição dessas classes, para obtenção dos mapas preliminares de cobertura da terra, as imagens foram segmentadas pela técnica de crescimento de regiões (RICHARDS, 1993), e em seguida, foi utilizado um classificador supervisionado (GONZALES e WOODS, 1992) de distância de Bhattacharya. Os mapas preliminares foram avaliados com dados coletados em visitas a campo: em outubro de 2013 e janeiro de 2014 foram visitados 114 pontos e realizadas entrevistas com os moradores da região sobre o histórico da cobertura da terra. Para a coleta dos dados pontos de dúvidas na classificação da cobertura foram selecionados a partir das imagens de satélite e verificados em campo.

Com base nos dados coletados, o mapeamento da cobertura da terra foi ajustado. Desse modo, foi possível obter o mapeamento da cobertura da terra para as três datas: 1985 ( $t_1$ ); 2010 ( $t_2$ ) e 2013 ( $t_3$ ). Enquanto os mapeamentos em  $t_1$  e  $t_2$  foram utilizados para identificar os padrões de mudanças na cobertura da terra e na calibração do modelo, o mapeamento em  $t_3$  foi utilizado para validação do modelo de previsão de mudança da cobertura da terra, apresentado a seguir.

## Modelagem e simulação da mudança da cobertura da terra

Nesta etapa, inicialmente são comparadas as áreas das classes de coberturas da terra em  $t_1$  e  $t_2$ , e calculadas e mapeadas as trocas entre as classes, para entendimento das mudanças de cobertura. Esse entendimento é necessário para definição das transições de interesse, que são aquelas associadas ao fenômeno investigado neste trabalho: a expansão do reflorestamento com eucalipto. Assim sendo, alguns tipos de transições, são descartados na construção do modelo de transição potencial, restando as transições de interesse que são as seguintes: Floresta para Pastagem e para Reflorestamento com Eucalipto; Pastagem para Floresta e para Reflorestamento com Eucalipto; e Vegetação Campestre Natural para Reflorestamento com Eucalipto e para Pastagem.

As transições de interesse, juntamente com variáveis explicativas das mudanças de cobertura da terra apresentadas na **Tabela 2**, foram utilizadas como entrada para a calibração do modelo que envolve o treinamento de uma rede neural (*Multi Layer Perceptron Neural Network* – MLPNN – HAYKIN, 2001) que identifica os padrões de mudança. Para escolha das variáveis explicativas é feito um teste de associação espacial: teste Cramer-V (LIEBERTRAU, 1983). Esse é um teste estatístico não paramétrico utilizado para medir a relevância de uma variável para explicar uma determinada mudança da cobertura da terra (EASTMAN, 2009).

No treinamento da MLPNN são avaliadas diversas combinações de diferentes conjuntos de variáveis explicativas e o conjunto que apresenta maior relevância para as transições de interesse é selecionado.

Após a etapa de calibração são obtidas as transições potenciais entre as coberturas da terra, e através de cadeia de Markov (BAKER, 1989), é feita a alocação espacial da mudança para  $t_3$ .

A simulação da cobertura da terra tem como base nas suposições de que: i. A demanda por eucaliptos de reflorestamento é crescente, e segue as taxas do período observado (1985 – 2010); ii. Há maior possibilidade de ocorrência de mudanças na cobertura da terra em áreas adjacentes às que mudaram no período observado (1985 – 2010); iii. As áreas de unidades de conservação de proteção integral são respeitadas e têm possibilidade de mudança quase nula.

Variável Explicativa	Descrição	Unidade /tipo	Fonte
Altitude	MDE ASTER, categorizado em intervalos de 100 m	m	ASTER GDEM (2014)
Embasamento Gnaisse-Granítico	Extraído do mapeamento geológico de MG	Dado categórico	CODEMIG (2014)
Declividade	Gerada a partir do MDE ASTER em intervalos definidos na publicação do IBGE (2009).	%	ASTER GDEM (2014)
Latossolo	Extraído do mapeamento de solos de MG	Dado categórico	FEAM (2010)
Precipitação Média Anual	Extraído das normais climatológicas	mm	INMET
Distância de Rodovias	Variável obtida a partir de um mapa de distâncias das rodovias	m	IBGE (2013)
Distância dos Cursos d'Água	Variável obtida a partir de um mapa de distâncias da rede hidrográfica	m	IBGE (2013)
Distância de Unidade de Conservação de Proteção Integral	Variável obtida a partir de um mapa de distâncias das unidades de conservação	m	IEF (2011)
Distância de Unidade de Conservação de Uso Sustentável			
Distância de Áreas Urbanas			
Distância de Áreas com Eucalipto	Variável obtida a partir de um mapa de distâncias a partir da classe de cobertura da terra mapeada	m	-
Distância de Áreas com Pastagem			
Área de Mudança	Variável obtida a partir da comparação entre cobertura da terra mapeada (1985 x 2010)	m	-
Produção Municipal de Madeira para Celulose	Soma do período 1990 – 2010 distribuída por município da bacia do rio Piracicaba	m <sup>3</sup>	IBGE (2011)
Produção Municipal de Carvão Vegetal	Soma do período 1990 – 2010 distribuída por município da bacia do rio Piracicaba	ton	IBGE (2011)
População Municipal 2010	Número de habitantes por município da bacia do rio Piracicaba	número de habitantes	IBGE (2010)
% PIB na Indústria Municipal	Média do período 1999 – 2010 distribuída por município da bacia do rio Piracicaba	%	IBGE (2011)
% PIB na Agropecuária Municipal	Média do período 1999 – 2010 distribuída por município da bacia do rio Piracicaba	%	IBGE (2011)
Pessoas Ocupadas na Indústria Municipal	Número de pessoas contabilizadas em 2010 distribuído por município da bacia do rio Piracicaba	número de pessoas	IBGE (2010)

Tabela 2 – Variáveis explicativas avaliadas para construção e calibração do modelo de transição potencial.

A validação da modelagem da cobertura da terra é executada por tabulação cruzada entre o mapeamento simulado e o mapeamento obtido por meio de imagem de satélite e dados de campo, para  $t$  3. Essa matriz é composta por índices de acertos e erros associados à previsão do modelo, que correspondem as seguintes situações (PEARSON, 2007): i. O modelo prediz presença e os dados de teste confirmam essa afirmação (acerto); ii. O modelo prediz presença, mas os dados de teste mostram ausência (falso-positivo); iii. O modelo prediz ausência, mas os dados de teste mostram presença (falso-negativo); iv. O modelo prediz ausência e os dados de teste confirmam (acerto).

No presente trabalho, a validação é realizada utilizando uma grade de resolução espacial 0,25 x 0,25 km. Assim, para cada célula da grade é avaliado um conjunto de pixels, mapeados e simulados, nos quais são computados acertos e não acertos, que indicam os locais onde o modelo superestima ou subestima mudanças na cobertura da terra. As diferenças entre os mapas são então mensuradas por meio de medidas de desvio padrão, média e mediana das áreas não coincidentes entre os dois

mapeamentos. Essa avaliação é feita para as classes mais representativas e de interesse deste trabalho: Reflorestamento com Eucalipto, Floresta e Pastagem.

## *Análise da estrutura da paisagem*

A análise da estrutura da paisagem é realizada de forma comparativa para as principais classes de cobertura da terra (FESM, Vegetação Campestre Natural e Reflorestamento com Eucalipto), em três tempos: 1985 ( $t_1$ ); 2010 ( $t_2$ ) e 2035 ( $t_4$ ). Essa análise é utilizada, no presente trabalho, para avaliar o grau de alteração da estrutura da paisagem por meio das seguintes métricas: área, número de manchas, número de áreas núcleo e nível de isolamento das manchas (FORMAN e GODRON, 1986; MCGARICAL e MARKS, 1995; RIBEIRO, 2010). O uso dessas métricas tem como objetivo avaliar o grau de fragmentação da paisagem, fornecendo dados para a discussão das implicações das mudanças na cobertura da terra em relação à conservação, possibilitando obter informações sobre a área das coberturas naturais que fornecem habitat para as espécies nativas; bem como sobre seu arranjo espacial e o grau de subdivisão e isolamento dessas coberturas (Lang e Blaschke, 2009). Essas métricas foram aplicadas em trabalhos que analisaram a fragmentação da paisagem no bioma Mata Atlântica, como os estudos de Ribeiro (2010), Maciel (2011), Juvanhol et al. (2011), Silva e Sousa (2014).

A métrica área é utilizada para calcular a representatividade das manchas das diferentes coberturas na paisagem, enquanto a métrica número de manchas é utilizada para mensurar o grau de subdivisão de determinada cobertura na paisagem. Embora não represente uma medida espacial como a área, a estratificação do número de manchas por tamanho de área é útil no auxílio ao entendimento dos processos de fragmentação da paisagem. Na métrica número de áreas núcleo é avaliada a estabilidade das manchas. Para isso, parte-se do pressuposto que as áreas mais próximas à borda da mancha são mais influenciadas por efeitos externos, e que por esse motivo, no seu setor interno, predominam condições ecológicas que conservam as condições mais parecidas com as originais e que favorecem a conservação do fragmento florestal. Desse modo, é descontada da área original da mancha, uma faixa de 100 m (MCGARICAL et al, 2005). A área que permanece após a exclusão dessa faixa é a área núcleo. A métrica isolamento das manchas avalia o grau de isolamento através do cálculo da distância euclidiana para o vizinho mais próximo. Essa distância é mensurada em metros a partir de uma mancha focal e da mancha vizinha mais próxima que pertence a mesma classe de cobertura (MCGARICAL e MARKS, 1995).

## RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados do mapeamento da cobertura da terra para 1985, 2010 e 2013; da modelagem das mudanças da cobertura da terra, que resultou em uma projeção e simulação para 2035, considerando um cenário de demanda crescente por eucalipto; e da caracterização da paisagem para 1985, 2010 e 2035, utilizando-se métricas de paisagem (área, número de manchas, número de áreas núcleo e isolamento das manchas), o que permite realizar uma avaliação e discussão do efeito potencial das mudanças de cobertura na estrutura futura da paisagem e seus possíveis impactos na conservação dos remanescentes de vegetação.

### *Cobertura da terra*

Na **Tabela 3** são apresentadas as áreas (em hectares) das 9 classes de cobertura da terra definidas e mapeadas a partir de imagens de sensoriamento remoto, para 1985, 2010 e 2013.



Classe de Cobertura da Terra	Área					
	1985		2010		2013	
	ha	%	ha	%	ha	%
Água	6636,33	0,65	7.280,84	0,71	7.189,35	0,71
Afloramento Rochoso	23925,38	2,37	22.849,16	2,26	22.849,16	2,26
Solo Exposto	14761,29	1,45	7.401,60	0,73	7.707,26	0,76
Vegetação Campestre Natural	60246,78	5,96	53.972,99	5,34	53.867,30	5,33
Reflorestamento com Eucalipto	157260,00	15,55	274.999,04	27,19	277.884,99	27,47
Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM)	397674,03	39,32	305.126,80	30,17	303.884,24	30,04
Pastagem	333813,31	33,00	297.902,72	29,45	295.313,91	29,20
Mineração	5216,26	0,52	14.768,52	1,46	15.405,99	1,52
Área Urbana	11957,32	1,18	27.189,03	2,69	27.388,50	2,71
<b>Total</b>	<b>1.011.490,70</b>	<b>100,00</b>	<b>1.011.490,70</b>	<b>100,00</b>	<b>1.011.490,70</b>	<b>100,00</b>

Tabela 3 – Áreas das classes de cobertura da terra para 1985, 2010 e 2013.

Pode-se observar na **Tabela 3**, que as classes de cobertura mais representativas na área de estudo são: Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM), Pastagem e Reflorestamento com Eucalipto. Contudo, há uma variação entre essas classes ao longo do tempo. De maneira geral, como pode ser observado na **Figura 3**, entre 1985 e 2010, ocorre um aumento expressivo das áreas de Reflorestamento com Eucalipto (+11,6 %) e diminuição das áreas de Pastagem (-3,55 %) e de FESM (-9,15 %), sugerindo que as áreas de reflorestamento se expandiram sobre as áreas de pastagem e floresta.

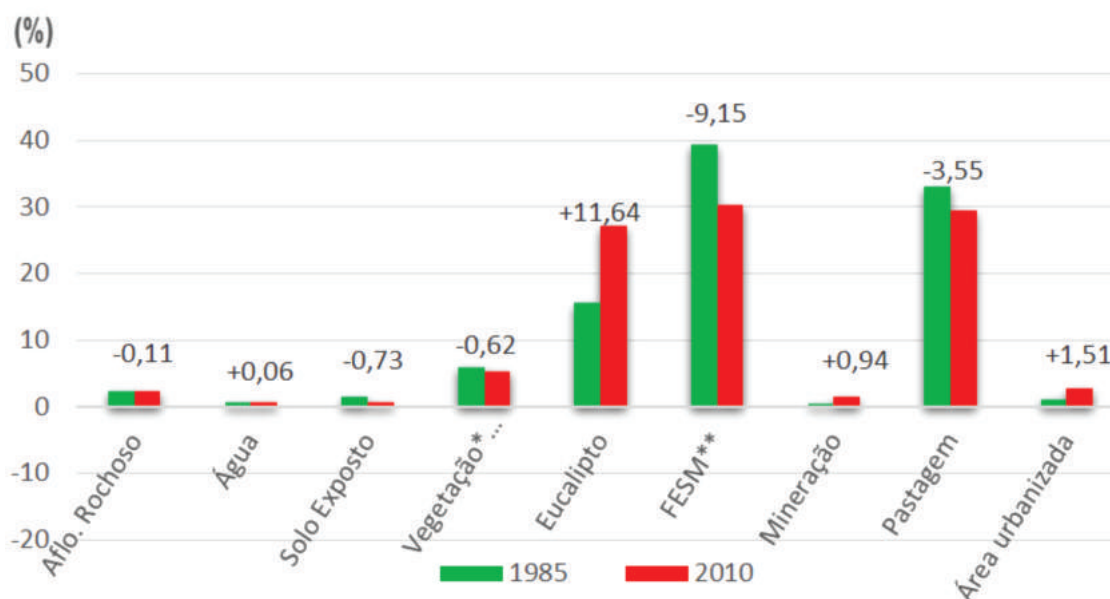


Figura 3 – Percentual de variação da cobertura da terra entre 1985 e 2010.

### Modelagem e simulação das mudanças da cobertura da terra

O resultado do teste Cramer-V, descrito na Seção 3, que avalia a relação das variáveis explicativas (**Tabela 2**) com as mudanças na cobertura da terra e seleciona as variáveis explicativas do modelo de transição potencial, é apresentado na **Tabela 4**. Segundo Eastman (2009), um valor de Cramer maior ou igual a 0,10 é recomendável para que a variável seja adicionada como explicativa no modelo de transição potencial, porque está mais correlacionada à mudança na cobertura da terra.

Variável Explicativa	Cramer – V	Status de Seleção
Altitude	0,1523	Selecionada
Embasamento Gnaisse-Granítico	0,1482	Não Selecionada
Declividade	0,0281	Não Selecionada
Latossolo	0,1683	Selecionada
Precipitação Média Anual	0,1324	Não Selecionada
Distância de Rodovias	0,0928	Não Selecionada
Distância de Cursos d'Água	0,0760	Não Selecionada
Distância de Unidade de Conservação de Proteção Integral	0,1033	Não Selecionada
Distância de Unidade de Conservação de Uso Sustentável	0,0829	Não Selecionada
Distância de Áreas com Eucalipto	0,3815	Selecionada
Distância de Áreas Urbanas	0,5113	Selecionada
Distância de Áreas com Pastagem	0,5560	Selecionada
Áreas de Mudança	0,3513	Selecionada
Produção Municipal de Madeira para Celulose	0,1354	Selecionada
Produção Municipal de Carvão Vegetal	0,1561	Selecionada
População Municipal 2010	0,1506	Selecionada
% PIB na Indústria Municipal	0,1360	Não Selecionada
% PIB na Agropecuária Municipal	0,1278	Não Selecionada
Pessoas Ocupadas na Indústria Municipal	0,1499	Selecionada

Tabela 4 - Valores de Cramer-V e variáveis explicativas selecionadas para inclusão no modelo de transição potencial.

A cobertura da terra em 1985 e 2010, juntamente com as variáveis explicativas selecionadas, são utilizadas para treinamento da MLPNN que identifica os padrões de mudança. O melhor ajuste obtido com a MLPNN foi de 94,28%, após 5.000 iterações, considerando o conjunto de variáveis selecionadas.

O processo de construção do modelo de transição potencial resultou no mapeamento das transições entre as classes de cobertura. Na **Figura 4** é apresentado o gráfico com o potencial de transição para as classes mais representativas que são Reflorestamento com Eucalipto, Pastagem e FESM.

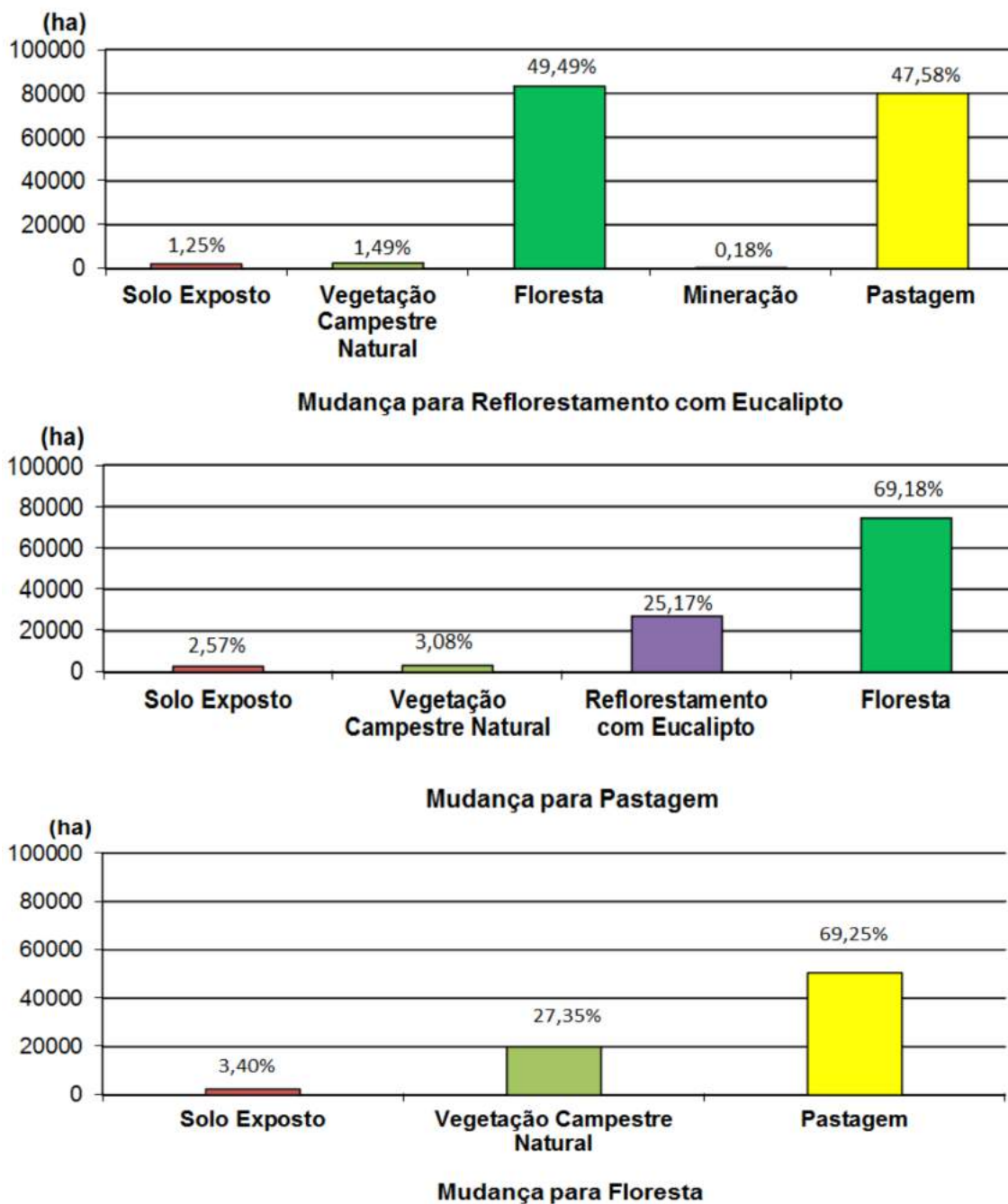


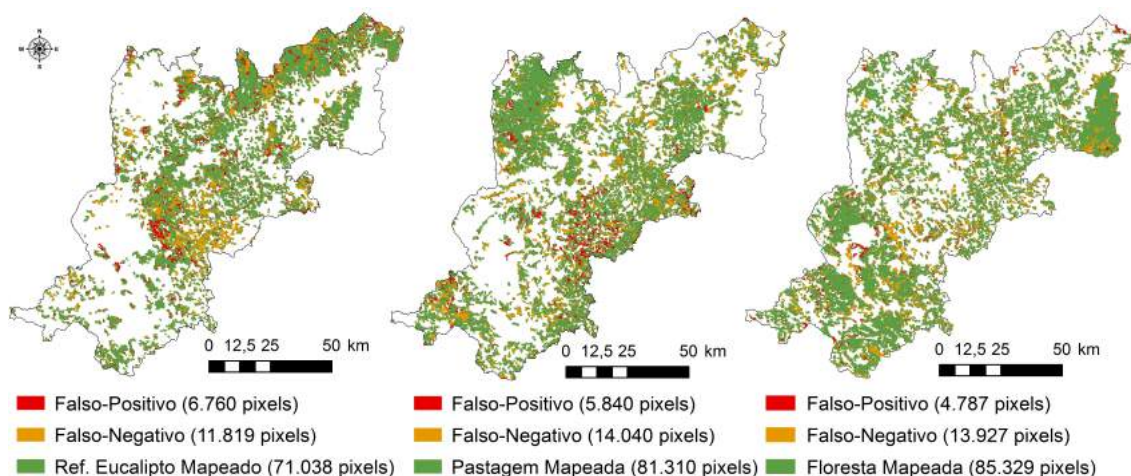
Figura 4 - Potencial de mudança das classes de cobertura da terra para as classes: Reflorestamento com Eucalipto, Pastagem e FESM.

Na **Figura 4** observa-se que o modelo de transição potencial mostra que as classes de cobertura que mais contribuem para o aumento das áreas de Reflorestamento com Eucalipto são as áreas de FESM (49,49%) e as áreas de Pastagem (47,58%). As mudanças para Pastagem são originadas, em sua maior parte, das áreas de FESM (69,18%) e das áreas de Reflorestamento com Eucalipto (25,17%), enquanto que a mudança para FESM ocorre na maioria das vezes, a partir da regeneração das áreas de Pastagem (69,25%) e de Reflorestamento com Eucalipto (27,35%).

### Validação do modelo

Com base na abordagem metodológica desenvolvida e descrita na seção 3, a validação do modelo foi realizada por meio da tabulação cruzada entre o mapa simulado para 2013 e o mapa obtido da

classificação das imagens do mesmo ano. O resultado é apresentado na **Figura 5**, no qual as áreas de falsos-positivos e falsos-negativos são destacados na grade com resolução espacial de 0,25 km. Cada mapa da Figura 6 representa uma das classes de interesse, e as áreas de concordância e de falso positivo e falso negativo.



(a)(b)(c)

Figura 5 – Mapas das áreas de falsos-positivos e falsos-negativos das classes de cobertura da terra simulada, utilizando uma grade com resolução espacial 0,25 km: (a) Reflorestamento com Eucalipto; (b) Pastagem; (c) FESM.

Conforme pode ser observado, para a classe Reflorestamento com Eucalipto, do total de 71.038 células (0,25 x 0,25 km), 6.760 (9,51%) são falso positivo e 11.819 (16,63%) falso-negativo. Na classe Pastagem, do total de 81.310 células (0,25 x 0,25 km), 5.840 (~7%) são falso-positivo e 14.040 (17%) falso-negativo. Na classe FESM, do total de 85.329 células (0,25 x 0,25 km), 4.787 (6%) são falso-positivo erro de inclusão e 13.927 (16%) falso-negativo. Por se tratar de uma grade de análise que engloba uma vizinhança de pixels, é possível que dentro de uma mesma célula 0,25 x 0,25 km existam diferentes percentuais de acerto entre a cobertura da terra mapeada e a simulada. Assim, é possível classificar cada uma das células em diferentes intervalos de concordância, conforme apresentado na **Tabela 5**.

Concordância entre Cobertura Mapeada e Simulada (%)	FESM		Pastagem		Reflorestamento com Eucalipto	
	Quantidade Células	(%)	Quantidade Células	(%)	Quantidade Células	(%)
0	381	0,45	474	0,58	736	1,04
0 – 25	1	0,00	0	0,00	4	0,01
25 – 50	8.131	9,53	10.789	13,27	12.597	17,73
50 – 75	1.704	2,00	1.634	2,01	1.438	2,02
75 – 85	7.877	9,23	6.508	8,00	3.578	5,04
85 – 95	620	0,73	475	0,58	226	0,32
95 – 100	66.615	78,07	61.430	75,55	52.459	73,85
<b>Total</b>	<b>85.329</b>	<b>100,00</b>	<b>81.310</b>	<b>100,00</b>	<b>71.038</b>	<b>100,00</b>

Tabela 5 - Intervalos de coincidência entre a cobertura da terra mapeada (2013) e a simulada (2013) para as classes FESM, Pastagem e Reflorestamento com Eucalipto para uma grade com resolução espacial 0,25 km.

Na Tabela 5 observa-se que mais de 95% das células apresentam concordância entre a cobertura da terra mapeada e a simulada, maior que 70%. Esses resultados foram considerados satisfatórios e a simulação da cobertura da terra para (2035) foi realizada tendo como base as transições entre 1985 e 2010, cuja principal mudança foi relativa à expansão das áreas de reflorestamento com eucalipto. Para

essa simulação foi também considerado que a demanda por eucalipto permanecerá crescente até 2035, embora os dados da produção anual de celulose (**Figura 6**) mostre que nos últimos dois anos houve uma retração no setor devido à crise econômica que assola todo o país. Ainda assim, como em outras crises, a tendência geral é do aumento da demanda uma vez que o cenário político, econômico e financeiro já mostra sinais de recuperação.

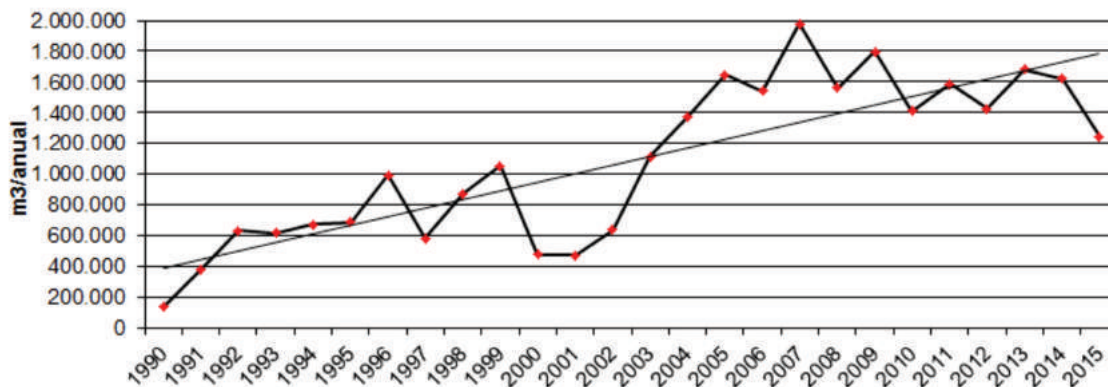


Figura 6 – Produção anual de eucalipto para celulose. Pesquisa Agropecuária – IBGE (2017).

Com essas premissas, a matriz de transição potencial simulada entre as classes de cobertura da terra para os anos de 2010 e 2035 é apresentada na Tabela 6.

	Aflo	Camp	SExp	Reflo	FESM	Água	Min	Pas	Urb
Aflo	<b>0,955</b>	0,0000	0,022	0,0000	0,0000	0,0000	0,021	0,0000	0,0000
Camp	0,000	<b>0,888</b>	0,005	0,034	0,0000	0,000	0,017	0,044	0,008
SExp	0,000	0,0000	<b>0,090</b>	0,170	0,168	0,007	0,154	0,187	0,221
Reflo	0,0000	0,0000	0,003	<b>0,677</b>	0,126	0,001	0,008	0,172	0,009
FESM	0,0000	0,0000	0,004	0,209	<b>0,579</b>	0,004	0,007	0,187	0,006
Água	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,006	<b>0,971</b>	0,022	0,0000	0,0000
Min	0,0000	0,0000	0,009	0,058	0,016	0,011	<b>0,868</b>	0,021	0,013
Pas	0,0000	0,0000	0,007	0,239	0,149	0,002	0,005	<b>0,569</b>	0,025
Urb	0,0000	0,0000	0,012	0,019	0,037	0,007	0,006	0,045	<b>0,870</b>

Aflo – Afloramento Rochoso  
 Camp – Vegetação Campestre Natural  
 SExp – Solo Exposto  
 Reflo – Reflorestamento com Eucalipto  
 FESM – Floresta Estacional Semidecidual Montana  
 Min – Mineração  
 Pas – Pastagem  
 Urb – Área Urbana

Tabela 6 - Matriz de transição potencial para as classes de cobertura da terra entre 2010 e 2035.

Com base na **Tabela 6** espera-se que em 2035 as classes de cobertura com menores chances de sofrer alterações sejam: Afloramento Rochoso (95,6%); Vegetação Campestre Natural (88,9%); Mineração (86,8%); e Área Urbana (87,0%). As transições mais significativas continuam sendo para as três classes de cobertura da terra que permanecem realizando trocas entre si: Floresta Estacional Semidecidual Montana, Pastagem e Reflorestamento com Eucalipto.

Na **Figura 7** é apresentado um gráfico comparativo da representatividade das classes de cobertura da terra mapeadas em 2010 e simuladas em 2035.

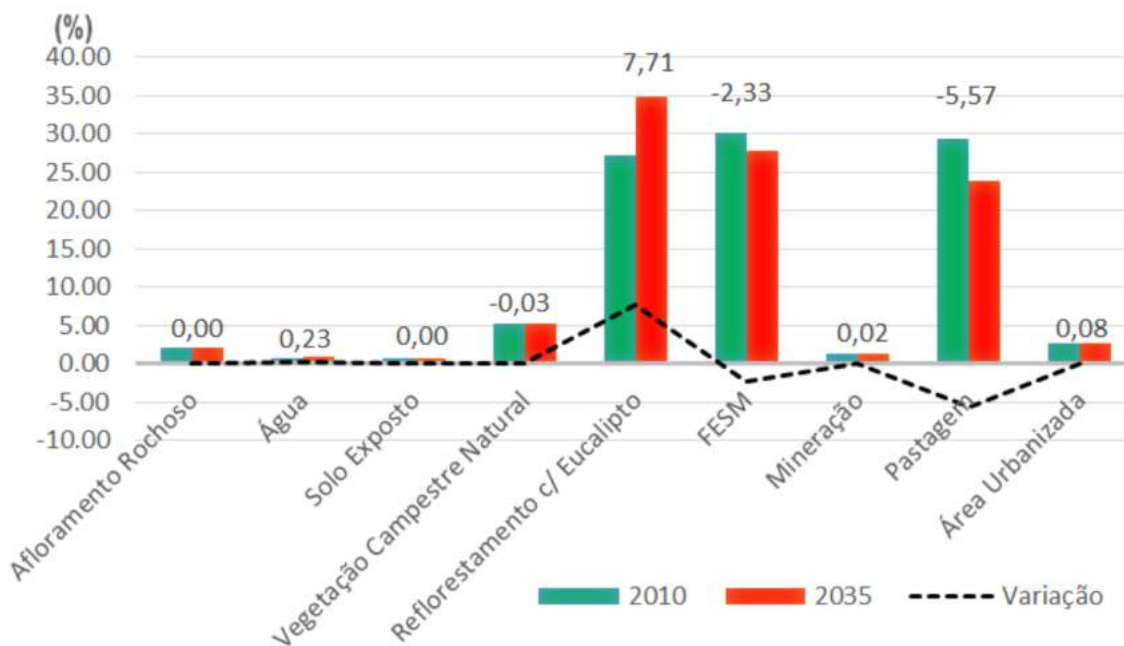


Figura 7 – Representatividade das classes de cobertura da terra em 2010 e 2035.

### Análise da estrutura da paisagem

A análise da estrutura da paisagem foi realizada para a cobertura da terra mapeada (1985 e 2010) e simulada (2035). As classes foram agrupadas e reclassificadas conforme apresentado na Tabela 8. Nessa reclassificação foram agrupadas as classes Afloramento Rochoso e Vegetação Campestre Natural em Refúgio Ecológico Montano; e Área Urbana, Solo Exposto e Mineração em Área Antropizada, pois são classes que desempenham papel semelhante na composição da paisagem.

Classe de Cobertura da Terra	Reclassificação
Afloramento Rochoso e Vegetação Campestre Natural	Refúgio Ecológico Montano
Floresta Estacional Semidecidual Montana	Floresta
Reflorestamento com Eucalipto	Reflorestamento
Pastagem	Pastagem
Água	Corpo d'Água
Área Urbana, Solo Exposto e Mineração	Área Antropizada

Tabela 7 - Agrupamento reclassificação das classes de cobertura da terra.

Às novas classes de cobertura da terra, apresentadas na Tabela 8, foi aplicada a métrica de área, que mostra a representatividade das classes de cobertura em termos de área (ha), para os anos de 1985, 2010 e 2035. O resultado é apresentado na **Figura 8**.

MODELAGEM DA EXPANSÃO DO REFLORESTAMENTO COM EUCALIPTO E EFEITOS NA ESTRUTURA DA PAISAGEM

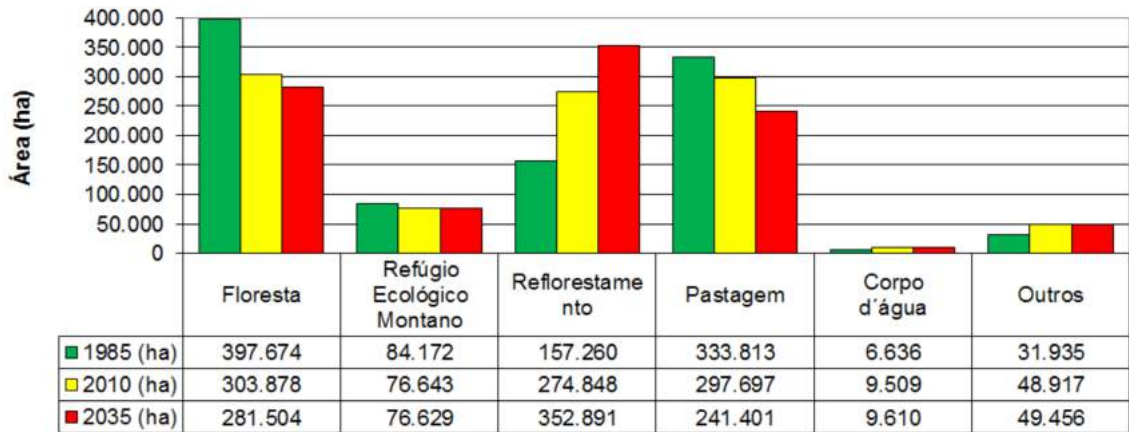


Figura 8 – Áreas das classes de cobertura da terra em 1985, 2010 e 2035.

Na **Figura 8** observa-se a evolução das transformações da paisagem para 1985, 2010 e 2035. Em 1985 e 2010 a classe mais representativa era a classe Floresta. Assumindo as premissas do modelo de mudança da cobertura (Seção 3), a tendência observada foi de domínio da classe Reflorestamento em 2035, com redução significativa das áreas de pastagem e, em menor proporção, das áreas de cobertura florestal. As classes Corpo d'Água e Refúgio Ecológico Montano apresentaram menores variações. Em relação aos corpos d'água, não são esperadas grandes variações, pois não ocorreram grandes mudanças entre 1985 e 2010. A classe Refúgio Ecológico Montano apresenta pequena variação por se concentrar em locais de difícil acesso, ou seja, em áreas de altitudes mais elevadas entremeadas por afloramentos rochosos.

A partir desses resultados, as classes mais representativas (Floresta, Reflorestamento e Refúgio Ecológico Montano) e prioritárias do ponto de vista da conservação na área de estudo foram avaliadas quanto ao número de manchas, número de áreas núcleos e grau de isolamento das manchas.

Na **Tabela 8** é apresentada a quantidade de manchas hierarquizadas em seis faixas de tamanho (área).

Área (ha)	Floresta			Refúgio Ecológico Montano			Reflorestamento		
	1985	2010	2035	1985	2010	2035	1985	2010	2035
< 50	708	723	2.764	168	216	292	481	478	6.439
50 – 100	257	316	289	69	71	55	222	282	273
100 – 200	150	204	182	37	36	24	128	147	181
200 – 500	92	127	95	35	34	20	77	91	80
500 – 1.000	46	33	35	14	11	6	22	28	27
1.000 – 10.000	38	34	28	15	15	12	26	21	21
10.000 – 20.000	1	2	3	1	1	1	0	1	1
> 20.000	4	3	2	0	0	0	0	1	2

Tabela 8 - Quantidade de manchas por classe de cobertura da terra e por faixa de tamanho (área).

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que, de modo geral, para todas as classes de cobertura da terra, ao longo do tempo, há um aumento no número de manchas na faixa de área menor que 50 ha. Isso é um indicativo de que entre 1985 e 2010 houve um processo de fragmentação da paisagem. Na paisagem de 2035 essa tendência se mantém, como esperado, havendo aumento no número de manchas nas faixas de tamanho menor que 50 ha, e redução, no número de manchas com tamanho maior que 100 ha.

Considerando como área núcleo a área total de uma mancha subtraída de uma faixa de 100 metros

(McGARIGAL e MARKS, 1995; RIBEIRO, 2010) a partir de sua borda, é possível avaliar o grau de estabilidade das manchas, baseado no pressuposto de que, as áreas mais próximas das bordas são mais influenciadas por fatores externos. Na **Tabela 9** é apresentado o número de áreas núcleo e a diferença em relação ao número de manchas para o intervalo de classe de até 50 ha. Essa análise é realizada apenas nessa faixa de tamanho porque é a faixa mais sensível ao processo de fragmentação da paisagem, cujo número de manchas será resultado da subdivisão de manchas maiores, que irá gerar um maior número de manchas com menores áreas núcleo.

Áreas núcleo com até 50 ha								
Floresta			Refúgio Ecológico Montano			Reflorestamento		
1985	2010	2035	1985	2010	2035	1985	2010	2035
429	422	849	107	104	107	339	428	1.208

Tabela 9 - Número de áreas núcleo com até 50 ha.

Os dados apresentados na **Tabela 9** mostram que em todas as classes de cobertura, nas datas analisadas, houve um aumento da quantidade de áreas núcleo no intervalo de tamanho até 50 ha. Esse fenômeno está relacionado com a fragmentação das manchas maiores conforme dados da **Tabela 8**. Na **Figura 9** é apresentado um gráfico que mostra comparativamente a variação da área total das manchas de cada classe de cobertura com a área núcleo. É possível observar que há um aumento progressivo das áreas de Reflorestamento. Em 2010, embora a área total das manchas de Floresta fosse superior a área de Reflorestamento, a relação de área núcleo entre as duas classes é semelhante, indicando que mesmo a Floresta sendo mais representativa, é composta por manchas isoladas e com menor área núcleo do que às manchas de Reflorestamento. Considerando o cenário simulado de expansão do Reflorestamento, é esperado que até 2035 as manchas de Reflorestamento sejam as mais representativas na paisagem.

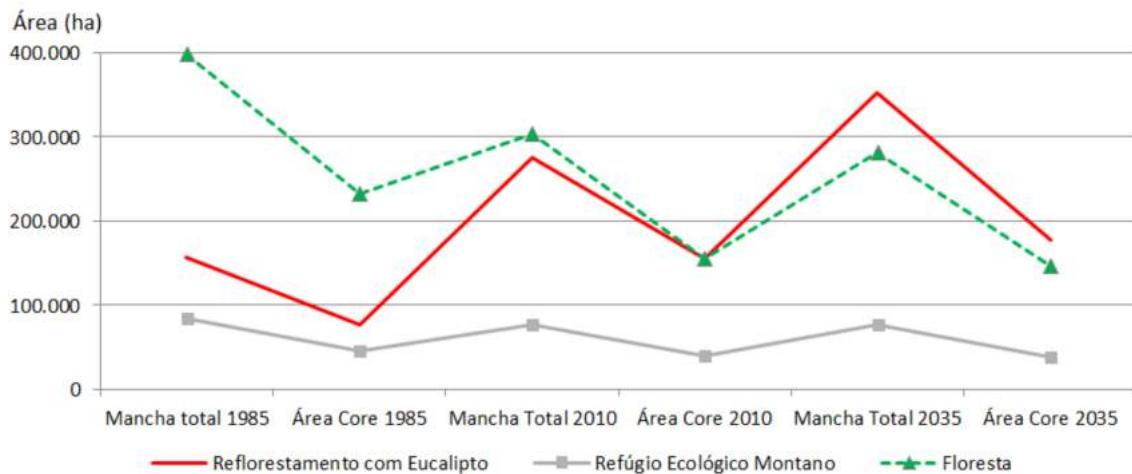


Figura 9 – Área versus área núcleo da mancha ao longo do tempo para as classes Floresta, Refúgio Ecológico Montano e Reflorestamento.

O resultado da análise do isolamento das classes Floresta, Refúgio Ecológico Montano e reflorestamento, respectivamente, é apresentado nas **Figuras 10, 11 e 12**, cuja medida utilizada permite avaliar o grau de isolamento entre as manchas (RIBEIRO, 2010) por meio do cálculo da menor distância para o vizinho mais próximo. Pode-se observar, nos mapas e nos gráficos, a evolução do grau de isolamento das manchas das classes de cobertura Floresta, Refúgio Ecológico Montano e Reflorestamento, entre 1985, 2010 e 2035



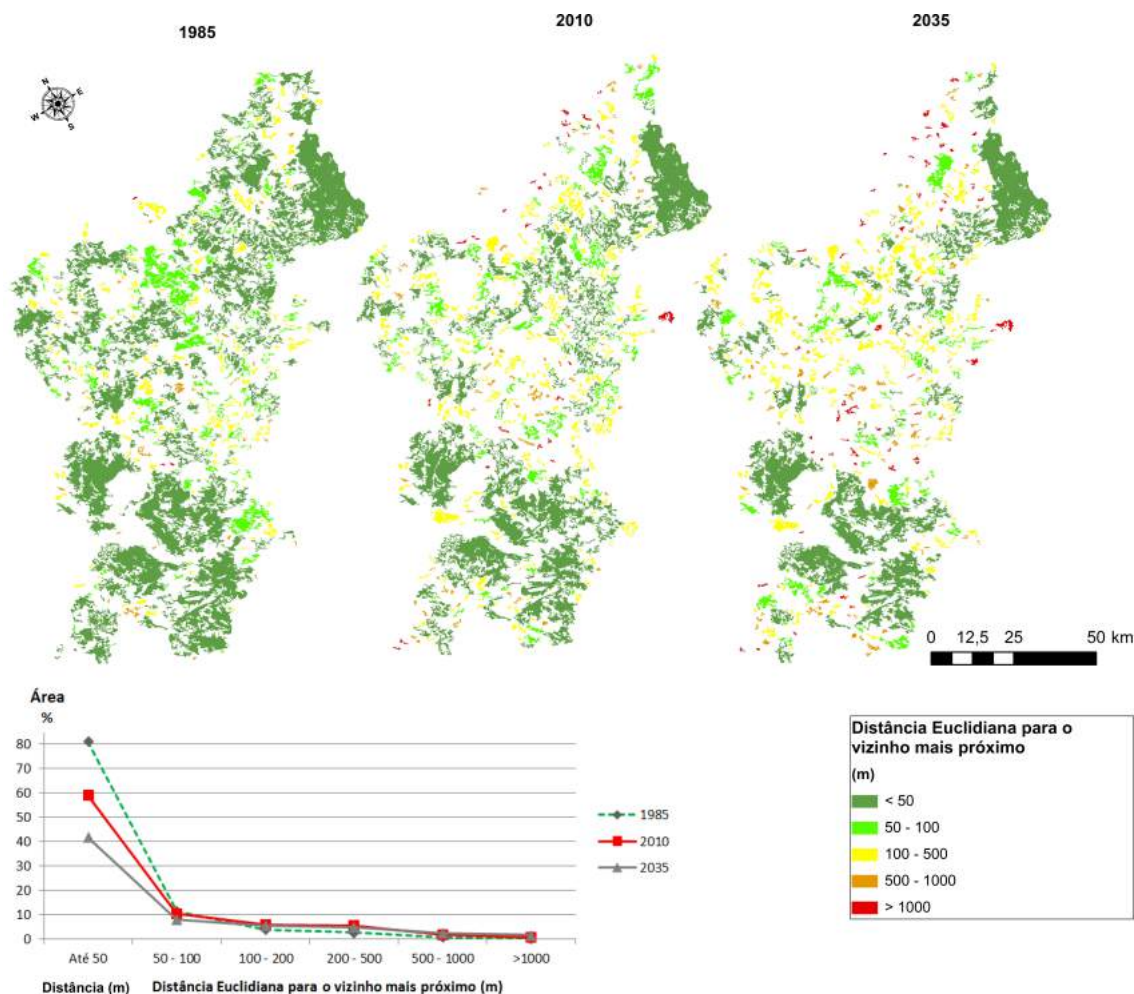


Figura 10 - Grau de isolamento das manchas da classe Floresta: 1985, 2010 e 2035.

Com base no gráfico apresentado na **Figura 10** tem-se que, em 1985 quase 80% das manchas da classe Floresta estavam localizadas a uma distância de até 50 m umas das outras. Em 2010 essa proporção foi reduzida para pouco mais de 50% e em 2035 para 45%, indicando uma tendência de aumento do isolamento das manchas dessa classe. Na paisagem simulada para 2035, 60% das manchas de Floresta estão localizadas a menos de 500 m umas das outras, enquanto que em 2010 e 1985, 70% e 98% das manchas estavam localizadas a menos de 500 m, respectivamente. Esses valores também indicam uma tendência no aumento do isolamento das manchas, que é efeito um prejudicial, pois diminui o acesso das metapopulações a essas áreas, aumentando o risco de extinção local e dificultando processos de recolonização das manchas.

Na Figura 11 é apresentado o resultado do grau de isolamento as manchas da classe Refúgio Ecológico Montano.

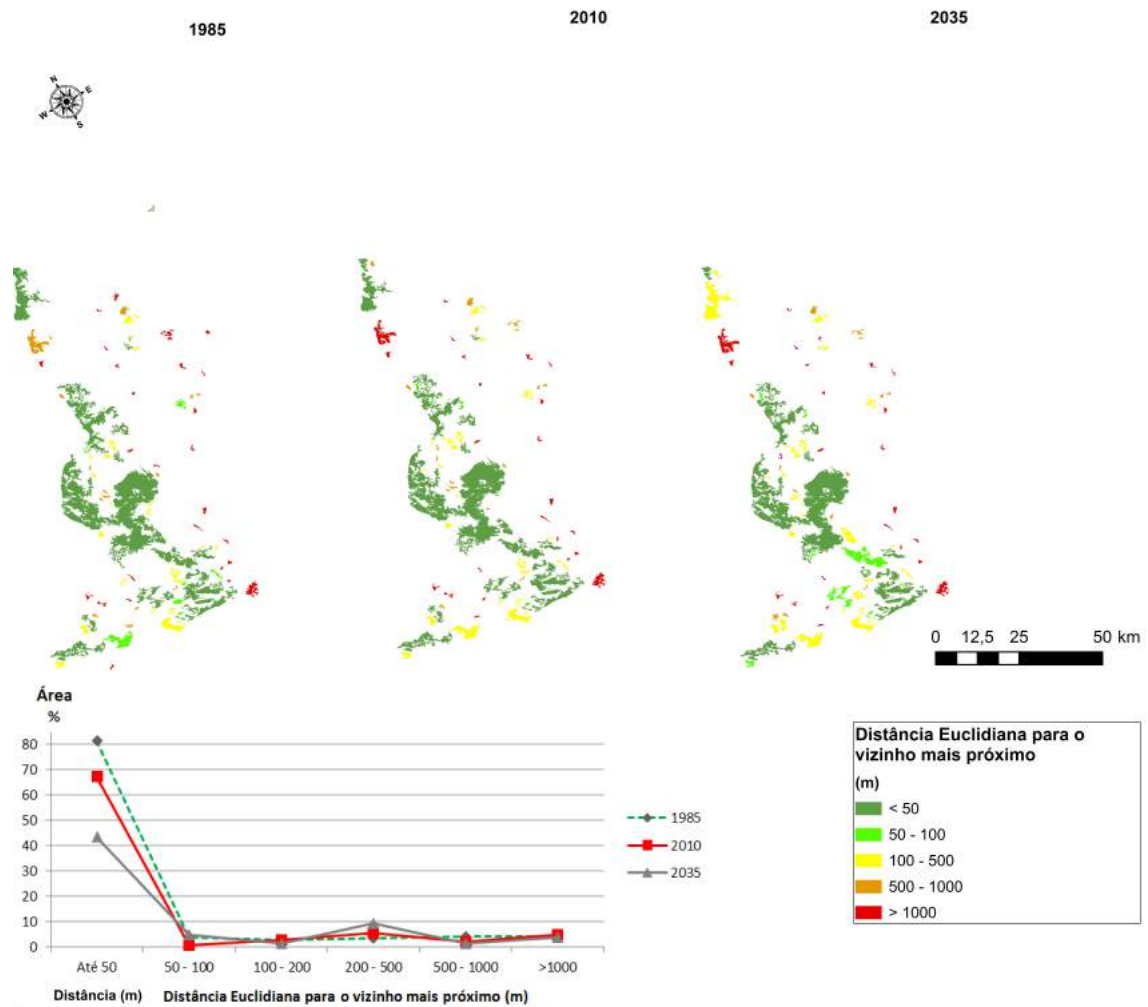


Figura 11 – Grau de isolamento das manchas da classe Refúgio Ecológico Montano: 1985, 2010 e 2035.

Os mapas e o gráfico da **Figura 11** mostram a evolução do isolamento das manchas da classe Refúgio Ecológico Montano ao longo do tempo. Essa é a classe de cobertura que menos sofreu alteração e, apesar disso, também apresentou uma tendência de aumento do isolamento das manchas. A maior variação desse indicador ocorre na faixa de distância de 50 m. Em 1985, mais de 80% das manchas dessa classe de cobertura estavam concentradas nessa faixa de distância; em 2010, esse número passou para pouco mais de 70%; e em 2035 é esperado que apenas 60% das manchas estarão localizadas a menos de 50 m umas das outras.

Em oposição à tendência observada nas classes de cobertura Floresta e Refúgio Ecológico Montano, para a classe Reflorestamento o grau de isolamento das manchas diminuiu, conforme pode ser observado no gráfico e nos mapas da Figura 12.

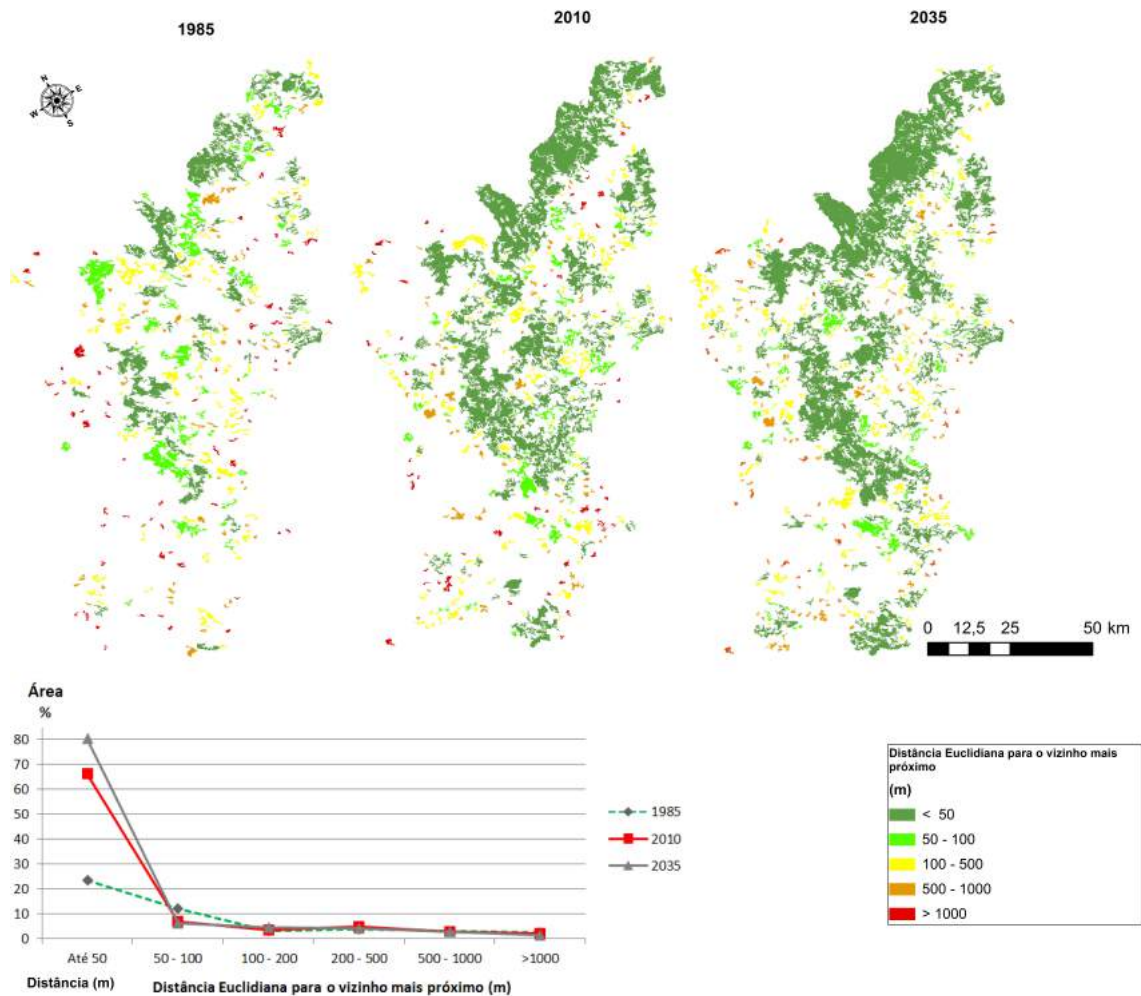


Figura 12 – Grau de isolamento das manchas da classe Reflorestamento: 1985, 2010 e 2035.

Há um aumento de área em todas as faixas de distância ao longo do tempo. Esse aumento é ainda mais significativo no percentual de manchas localizadas até 50 m de distância. Em 1985, cerca de 20% das manchas estavam localizadas a uma distância de até 50 m de outra mancha; em 2010 esse número passou para cerca de 65%; e em 2035, a paisagem simulada mostra que 80% das manchas estão localizadas a uma distância de até 50 m.

Na paisagem simulada (2035), a partir do pressuposto de aumento da produção de carvão e celulose, há uma expansão das manchas da classe Reflorestamento, formando um “corredor de reflorestamento”, que diminuiu o isolamento das manchas dessa classe. Esse resultado deve ser avaliado com cautela, pois implica na possibilidade da expansão de uma cobertura vegetal arbórea com uma estrutura mais complexa do que as de gramínea, que compõe as áreas de pastagem, e eram predominantes em 2010. É preciso avaliar em que medida essas áreas poderiam ser úteis para propósitos de conservação. De maneira geral as áreas de plantio de eucalipto apresentam menor variedade de flora que as florestas nativas que substituem, e maior variedade de flora ao substituírem pastagens, áreas com outros cultivos agrícolas ou terras degradadas. Quando esse plantio é feito sobre áreas de vegetação nativa, certamente haverá algum efeito negativo sobre a flora e fauna, uma vez que podem ocorrer algumas alterações do ambiente como perturbações no solo, mudança no padrão de sombra, mudança na competição por água e nutrientes e alterações químicas (POORE e FRIES, 1985). O tamanho e extensão desses impactos variam de acordo com a área plantada, mas o que se conclui é que essa monocultura não será capaz de ofertar a mesma diversidade de serviços que as florestas nativas. Nesse sentido, é preciso trabalhar técnicas que reservem faixas de vegetação nativa formando corredores com árvores frutíferas e espécies da flora nativa que possam suprir a fauna da região (DAVIDSON, 1985). É preciso considerar também o fato de que são frequentemente cortadas e podem não oferecer recursos suficientes em

quantidade e qualidade para serem utilizadas como habitat para várias populações. Porém, podem funcionar como corredor entre manchas de vegetação nativa favorecendo a conectividade.

## CONCLUSÕES

Dos resultados dos mapeamentos de cobertura da terra tem-se que as principais mudanças dessa cobertura na área de estudo ocorreram principalmente nas classes Reflorestamento com Eucalipto, Floresta Estacional Semidecidual Montana e Pastagem. Entre 1985 e 2010, houve diminuição das áreas de Pastagem e de Floresta Estacional Semidecidual Montana e aumento das áreas de Reflorestamento com Eucalipto. A área de Reflorestamento com Eucalipto foi a que mais cresceu nesse período de 25 anos. A expansão da área dessa cobertura está fortemente associada ao estabelecimento e expansão das indústrias siderúrgica e de papel e de celulose.

O modelo de transição potencial mostrou que as variáveis que melhor explicam as mudanças na área de estudo são: a distância das áreas com eucalipto, distância das pastagens, distância de áreas urbanas e distância das áreas onde houve alguma mudança de cobertura entre as datas avaliadas. Essa última obteve índice mais alto e está alinhada com os pressupostos da primeira lei da Geografia que diz que “as coisas mais próximas estão mais relacionadas entre si do que as coisas mais distantes” (TOBLER, 1970).

Na simulação da cobertura da terra para 2035 foi suposto que a demanda por eucalipto continuará crescendo no mesmo ritmo observado entre 1985 e 2010. Essa simulação aponta para um cenário onde as classes de cobertura da terra mais representativas ainda serão Floresta Estacional Semidecidual Montana, Pastagem e Reflorestamento com Eucalipto. Contudo, até 2035, de acordo com os pressupostos do modelo, é esperado que a cobertura mais representativa seja de Reflorestamento com Eucalipto e não mais Floresta Estacional Semidecidual Montana e Pastagem.

Os resultados da simulação da cobertura da terra incluem algumas limitações relativas ao processo de modelagem e à ferramenta utilizada, os quais estão baseados em suposições e não contemplam todas as variáveis que condicionam a dinâmica da mudança da cobertura da terra. Desse modo, os resultados da simulação apresentam uma tendência baseada num conjunto de variáveis explicativas e num cenário econômico de crescente expansão do eucalipto, que mesmo nos dois últimos anos, quando houve retração econômica no país, não descaracterizam a tendência global de crescimento do setor, já que o setor é mais atrelado ao mercado externo do que interno. Essas variáveis não representam a totalidade das complexas relações que moldam o processo de alteração da cobertura da terra e da paisagem, mas apenas uma pequena parcela delas, contemplando, na medida do possível, os aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos, na tentativa de representar de forma idealizada um complexo fenômeno natural: a mudança na cobertura da terra.

A análise da alteração da estrutura da paisagem mostra um resultado indicativo de diminuição do isolamento das manchas de reflorestamento e aumento do isolamento das manchas de floresta. A tendência é que cada vez mais as grandes manchas florestais fiquem mais isoladas na paisagem, e cada vez mais restritas às unidades de conservação de proteção integral. Por outro lado, as áreas de reflorestamento tendem a se expandir a partir da área atual para áreas adjacentes, formando grandes manchas de reflorestamento.

A possibilidade da demanda por eucalipto, pelas usinas siderúrgicas e pelas indústrias de papel e de celulose, continuar crescendo na região é real, uma vez que o setor apresenta seguidas altas de crescimento desde o início dos anos 2000. Nesse caso é preciso avaliar os benefícios socioeconômicos e ambientais de monoculturas como aquelas de eucaliptos, frente à necessidade de conservação. O plantio de eucalipto gera riqueza econômica e, em geral, emprega os habitantes locais, e no aspecto ambiental contribui para atenuação do efeito estufa relacionado ao sequestro de carbono, até que seja cortado. Por outro lado, não é possível encontrar a mesma diversidade ambiental das áreas de florestas, uma vez que suas funções ecológicas para a fauna e flora representam um sistema mais simplificado e mais pobre do que as florestas. Assim, é preciso avaliar as consequências, no longo prazo, do contínuo aumento da demanda por eucalipto, que pode alterar o equilíbrio ambiental da região.

Desse modo, é preciso estabelecer políticas públicas que visem combinar as demandas sociais, ambientais e econômicas, a partir de um planejamento regional que considere a paisagem e seu arranjo

especial como importantes elementos, que possibilitam oferecer as populações e comunidades locais maior conectividade e oferta de habitats entre os remanescentes florestais, incluindo as áreas de eucalipto, que podem funcionar como habitat e corredores, reduzindo o isolamento das manchas florestais. Nesse sentido, pesquisas baseadas em modelagem ambiental e análise de paisagem constituem ferramentas que permitem o diagnóstico e o prognóstico de uma região, contribuindo assim para o melhor planejamento e gestão da ocupação territorial.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF). Anuário estatístico ABRAF 2013 - ano base 2012. Brasília: ABRAF, 2013. 142 p.
- BRASIL. Lei Federal 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: . Acesso em: 20 fev. 2015.
- CLARCK LAB. The land change modeler for ecological sustainability. Worcester, 2009. Catálogo. Disponível em: . Acesso em: 20 maio 2013.
- Celulose Nipo-Brasileira (cenibra). Plano de manejo florestal: resumo público. Belo Oriente: Celulose Nipo-Brasileira S.A., 2012. 138 p.
- CHAVEZ JR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 24, n. 2, p. 459–479, 1988. Disponível em: . Acesso em: 23 maio 2013.
- CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49 (1): 69-74, 1983.
- DAVIDSON, J. “Setting aside the idea that eucalyptus are always bad”. UNDP/FAO project Bangladesh, (Working Paper, 10); BGD/79/017, 1985.
- EASTMAN, J. R. IDRISI Taiga: guide to GIS and image processing: Clarcks Lab, 2009. 342 p.
- FORMAN, R. T. T., GODRON, M. Landscape ecology. New York: Jonh Wile & Sons, 1986. 619 p.
- Fundação SOS Mata Atlântica; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica. Período 2012-2013. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2014. 61 p.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. Digital Image Processing. Reading: Addison-Wesley, 1992, 716p.
- GRECCHI, R. C.; BEUCHLE, R.; VOGT, P.; SHIMABOKURO, Y. E.; GOMES, A. R. The potential of landscape metrics for assessing the impacts of selective logging in the Brazilian Amazon. In: Encontro Nacional de Estudos Populacionais, n. 17, 2010, Caxambu-MG. Anais... Santos-SP: INPE, 2016. p. 1684–1691.
- HAYKIN, S. Redes neurais. 2<sup>nd</sup> Ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo demográfico 1980. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. Disponível em: . Acesso em: 30 abr. 2013.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo demográfico 1991. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. Disponível em: . Acesso em: 30 abr. 2013.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo demográfico 2000. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. Disponível em: . Acesso em: 30 abr. 2013.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: . Acesso em: 30 abr. 2013.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção da extração vegetal e da silvicultura

2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em: . Acesso em: 30 abr. 2013.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produto interno bruto dos municípios 2012. Disponível em: . Acesso em: 3 dez. 2013.
- ISLAM, M. S.; AHMED, R. Land use change prediction in Dhaka City using GIS aided markov chain modeling. *Journal of Life and Earth Science*, v. 6, p. 81–89, 2011. Disponível em: . Acesso em: 1 jun. 2013.
- JOHNSON, S. J. An evaluation of land change modeler for ArcGIS for the ecological analysis of landscape composition. 2009. 116 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geografia). Southern Illinois University Carbondale, Illinois, 2009. Disponível em: . Acesso em: 13 maio 2013.
- JUVANHOL, R. S.; FIEDLER, N. C.; SANTOS, A. R.; PIROVANI, D. B.; LOUZADA, F. L.; DIAS, H. M.; TEBALDI, A. L. C. Análise espacial de fragmentos florestais: caso dos Parques Estaduais de Forno Grande e Pedra Azul, Estado do Espírito Santo. *Floresta e Ambiente*. 18, 353-364, 2011.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. Análise da paisagem com SIG. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 424 p.
- LANG, S.; TIEDE, D. V-LATE. Extension für ArcGIS – vector basiertes Tool zur quantitativen Landschaftsstrukturanalyse. ESRI An wender konferenz. Innsbruck. 2003. Disponível em: <http://downloads2.esri.com/campus/uploads/library/pdfs/68464.pdf>. Acesso em: 5 set. 2015.
- Liebetrau, A. Measures of association. Beverly Hills: Sage Publications, 1983. Disponível em: . Acesso em: 26 dez. 2013.
- LO, C. P.; YEUNG, A. K. W. Concepts and techniques of geographic information systems. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 492 p.
- LUIZ, C. H. P.; FARIA, S. D.; ESCADA, M. I. S. A expansão do reflorestamento com eucalipto e seus efeitos na estrutura da paisagem: bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço – Minas Gerais. *Geografias*, v. 12, p. 64-88, 2016.
- MACIEL, L. V. B. Análise dos remanescentes de Mata Atlântica no Estado do Rio Grande do Norte: uma perspectiva em alta resolução. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brazil, 2011. 60 p.
- MAS, J. F.; KOLB, M.; PAEGELOW, M.; OLMEDO, M. T. C.; HOUET, T. Inductive pattern-based land use/cover change models: a comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, v. 51, p. 94-111, 2014. Disponível em: . Acesso em 15 ago. 2014.
- McGARIGAL, K.; MARKS, B. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Forest Service General, US. (Technical Report PNW: 351), 1995.
- MACGARIGAL, K.; CUHSMAN, S.; REGAN, C. Quantifying Terrestrial Habitat Loss and Fragmentation: A Protocol. University of Massachusetts, 2005. Disponível em: [http://www.umass.edu/landeco/teaching/landscape\\_ecology/labs/fragprotocol.pdf](http://www.umass.edu/landeco/teaching/landscape_ecology/labs/fragprotocol.pdf)
- POORE, M. E. D; FRIES, C. The ecological effects of eucalyptus. FAO, 1985
- RAJAN, D. Understanding the drivers affecting land use change in Ecuador: Na application of the Land Change Modeler Software. University of Endinburhg. Endinburhg, Scotland, 2015. 84 p.
- RENÓ, V.; NOVO, E.; ESCADA, M. Forest Fragmentation in the Lower Amazon Floodplain: Implications for Biodiversity and Ecosystem Service Provision to Riverine Populations. *Remote Sensing*. v. 8, 26 p. 2016.
- RIBEIRO, M. C. Modelos de simulação aplicados à conservação de paisagens fragmentadas da Mata Atlântica brasileira. 2010. 277 p. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010. Disponível em: [www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde.../Ribeiro\\_2010.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde.../Ribeiro_2010.pdf)
- >. Acesso em: 10 mar. 2014.

- RICHARDS, J. A. Remote sensing digital image analysis: an introduction. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 454 p. *Visualizar postagem compartilhada*
- SALMONA, Y. B. Cerrado com C ou S? modelagem de cenários futuros para o bioma. Dissertação de Mestrado, Publicação PPG EFL.DM 197/2013, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF, 2013. 87 p.
- SCHULZ, J. J.; CAYUELA, L.; ECHEVERRIA, C.; SALAS, J.; BENAYAS, J. M. R. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975–2008). *Applied Geography*. v. 30, n. 3, p. 436-447, 2010.
- SILVA, M. S. F.; SOUZA, R. M.. Padrões Espaciais de Fragmentação Florestal na Flona do Ibura – Sergipe. *Mercator*. 13 (3), 121-137, 2014.
- TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, v. 46, n. 2, p. 234-240, 1970.
- UMBELINO, G.; BARBIERI, A. Uso de autômatos celulares em estudos de população, espaço e ambiente. In: Encontro Nacional de Estudos Populacionais, n. 17, 2010, Caxambu-MG. Anais... Caxambu-MG: ABEP, 2010. p. 1–20. Disponível em: . Acesso em: 23 maio 2013.
- VELDKAMP, A.; FRESCO, L. O. CLUE: A conceptual model to study the conversion of land-use and its effects. *Ecological Modelling*, v. 85, n. 2, p. 253-270, 1996. Disponível em: . Acesso em: 1 abr. 2013.
- WANG, X.; BLANCHET, F. G.; KOPER, N. Measuring habitat fragmentation: An evaluation of landscape pattern metrics. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 5, p. 634-646.