

# MODELAGEM DINÂMICA DO DESMATAMENTO NO SUL DA AMAZÔNIA OCIDENTAL

*Dynamic modeling of deforestation in the South of the Western Amazon, Brazil*

**Patricia Christiana S. de S. Oliveira\***

**Alex Mota dos Santos\*\***

**Nilson Clementino Ferreira\*\*\***

**\*Instituto Federal de Educação Tecnológica de Goiás - IFG / Goiânia, Goiás**

patriciac\_geoprocessamento@hotmail.com

**\*\*Universidade Federal de Goiás - UFG / Aparecida de Goiânia, Goiás**

alex.geotecnologias@gmail.com

**\*\*\*Universidade Federal de Goiás – UFG / Goiânia, Goiás**

nclferreira@gmail.com

## RESUMO

O estado de Rondônia é, dentre aqueles que compõem a região da Amazônia Ocidental, o que apresentou a maior área desmatada. Isso ocorreu devido à opção do Estado Nacional pela propriedade privada da terra e pela expansão capitalista, em detrimento da conservação e das formas tradicionais de uso. Desse modo, o objetivo desse estudo é realizar a modelagem dinâmica do desmatamento, de 2015 a 2050, no estado de Rondônia. As metodologias empregadas foram a modelagem ambiental e a tomada de decisão com base no Sistema de Informação Geográfica (SIG). A modelagem dinâmica dos desmatamentos foi elaborada por meio da utilização do *software* DINAMICA EGO. Os resultados revelaram que o avanço do desmatamento, até 2015, ocupou 37,68% da área do estado de Rondônia e atingirá 54,87%, até 2050. Além disso, o desmatamento será maior em áreas próximas à malha viária, às manchas urbanas e às áreas já desmatadas. Em contrapartida, a conservação da vegetação se tornará mais expressiva junto às áreas especiais, às terras indígenas e às unidades de conservação. Por fim, a partir do mapa de projeção da retirada da vegetação para o ano de 2050, foi possível constatar que a retirada da vegetação será maior na porção noroeste, especialmente no município de Porto Velho.

**Palavras-chave:** Modelagem dinâmica ambiental. Região amazônica. Rondônia.

## ABSTRACT

Rondonia state is among those that make up the Western Amazon region, which had the largest deforested area. This occurred due to the National State's option for private land ownership and capitalist expansion, to the detriment of conservation and traditional forms of use. Thus, the objective is to carry out the dynamic modeling of deforestation from 2015 to 2050 in the state of Rondônia. Methodology was contemplated by environmental modeling and decision making based on the Geographic Information System (GIS). Dynamic modeling of deforestation was developed using the software "DINAMICA EGO". Results revealed that the advance of deforestation until 2015 occupied 37.68% of the area of the state of Rondônia and will reach 54.87%, by 2050. In addition, deforestation will be greater in areas close to the road network, urban areas and areas already deforested. On the other hand, conservation of vegetation will be more expressive with special areas, indigenous lands and conservation units. Finally, from the projection map of the removal of vegetation for the year 2050 it was possible to verify that the removal of vegetation will be greater in the northwestern portion, especially in the municipality of Porto Velho.

**Keywords:** Environmental dynamic modeling. Amazon region. Rondônia state.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de consolidação da ocupação na região Amazônica foi motivado pelas ações do Estado Nacional, que optou pelo incentivo à propriedade privada da terra e à expansão capitalista, em contraposição ao emprego de formas tradicionais de uso. Para isso, o Estado Nacional recebeu incentivos financeiros do Banco Mundial, por meio do financiamento de projetos de colonização, entre os quais o Programa Integrado de Desenvolvimento do Noroeste do Brasil (POLONOROESTE). As influências mais marcantes desse período foram, sem dúvida, os projetos de colonização do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), a abertura de estradas e rodovias e a pavimentação da BR-364. Diversos autores concordam que foi nesse período que ocorreu a consolidação da ocupação não indígena e o povoamento em Rondônia (FEARNSIDE, 1980; AMARAL, 1998; CIM, 2003; OLIVEIRA, 2003).

As atividades do INCRA foram agrupadas em Projetos Integrados de Colonização (PICs), Projetos de Assentamentos Dirigidos (PADs) e Projetos de Assentamentos (PAs). Os incentivos, especialmente através de distribuição de terras, resultaram em fluxo migratório de pessoas de todas as regiões do país para o estado de Rondônia.

Acerca desse período, Fearnside (1987, p. 1) afirmou que “a extensão e a velocidade da derrubada da floresta úmida na Amazônia brasileira forneceu amplos motivos para preocupação sobre o futuro da floresta”. O resultado desse processo pode ser observado pelos dados do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) (2015), que indicam Rondônia (RO) como o terceiro estado com maior área desmatada na região Amazônica e com a maior área desmatada na Amazônia Ocidental.

A tentativa de contornar o processo devastador da floresta foi aprovada em março de 1992, com o Plano Agropecuário e Florestal de Rondônia (PLANAFLORO), cujo objetivo foi ordenar e reordenar a ocupação no estado e corrigir as distorções decorrentes do POLONOROESTE. Contudo, segundo Rodrigues (2002, p. 79), o PLANAFLORO “foi mais um instrumento usado para endossar agendas políticas específicas das instituições nele envolvidas do que para promover o manejo sustentável dos recursos naturais de Rondônia”. A autora reforça afirmando que, com a crise da década de 1990, o PLANAFLORO foi mais um modo de financiamento dos projetos da elite política rondoniense. O movimento desse grupo emanava e ainda emana do parlamento estadual, em que grupos políticos, representantes de madeireiras, mineradores e agronegócio ditavam e ditam os rumos das políticas de investimento no estado.

Por um lado, apesar de ser um projeto que atendeu aos anseios das elites, o PLANAFLORO alcançou, inicialmente, algumas conquistas importantes para a conservação da sociobiodiversidade, entre as quais figuram a demarcação de terras indígenas, as unidades de conservação de proteção integral e os estudos de impacto da ocupação dirigida no estado de Rondônia. No entanto, as pressões dos grupos econômicos locais forçaram a revogação de duas das cinco unidades de conservação de proteção integral criadas no âmbito do PLANAFLORO, os parques estaduais de Candeias e Serra dos Parecis. Esses dois parques tiveram suas áreas revogadas, de uma única vez, por meio de lei complementar, votada e aprovada pela Assembleia Legislativa do estado de Rondônia, em 31 de maio de 2010, o que favoreceu o aumento da área desmatada no estado.

Desse modo, apesar de os resultados do PRODES indicarem crescimento da área desmatada no estado de Rondônia, a retirada da vegetação não se encontra consolidada, devido à presença de áreas especiais, o que permite estimar cenários futuros. Esse é o foco desta pesquisa que, ao quantificar a área desmatada para o ano de 2050, avalia as influências das áreas especiais para mitigação do crescimento do desmatamento em Rondônia.

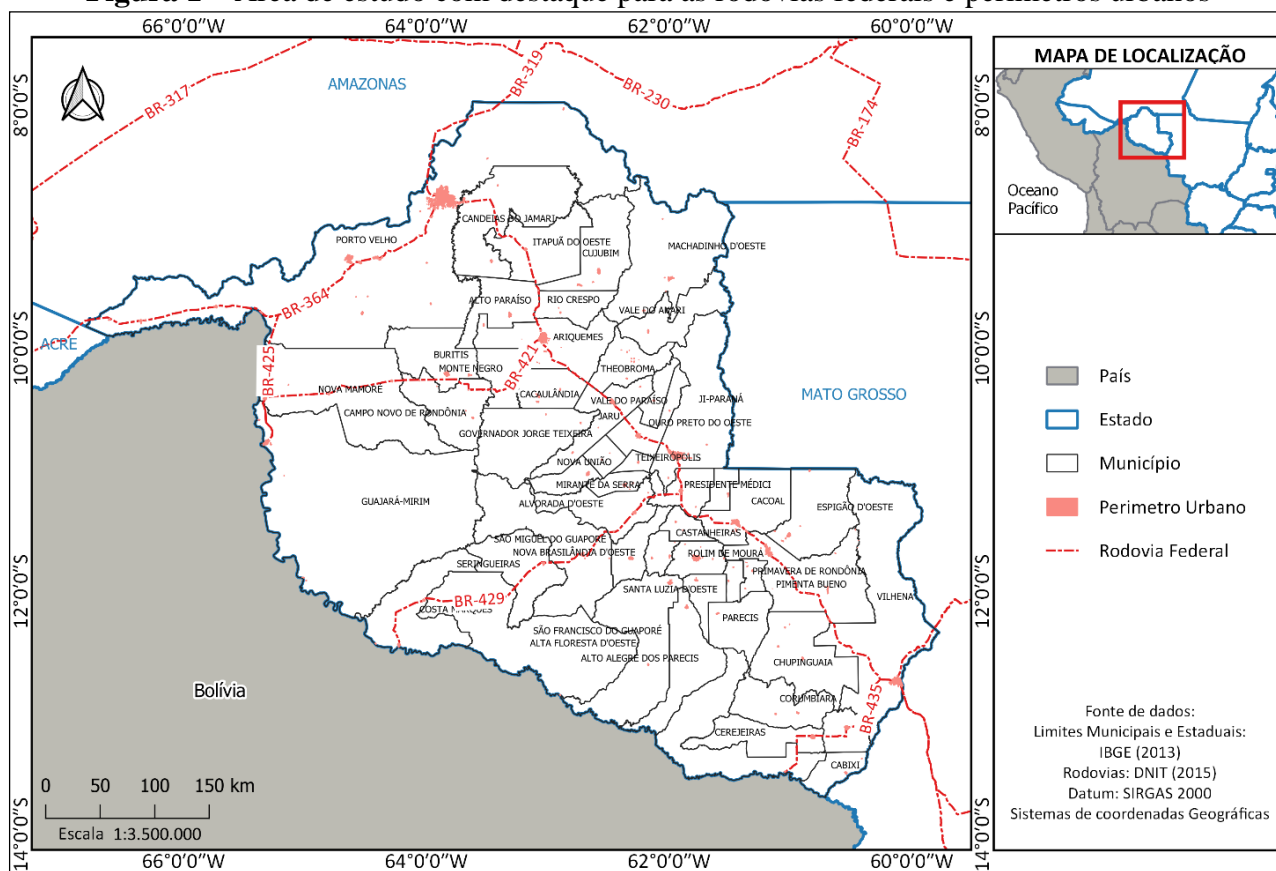
O PRODES é um projeto desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) para monitorar o desmatamento anual da Amazônia. Desse modo, a partir dos dados e das informações disponíveis, o objetivo deste trabalho foi realizar a modelagem dinâmica para verificar os avanços futuros dos desmatamentos no estado de Rondônia, de 2015 a 2050. A modelagem dinâmica de

cenários futuros é um processo que auxilia o entendimento dos mecanismos de desenvolvimento da modelagem ambiental, assim, é possível determinar o comportamento do objeto modelado em diversos aspectos, como social, econômico, político e ambiental (PIONTEKOWSKI *et al.*, 2014).

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O estado de Rondônia (Figura 1) está localizado no sul da Amazônia Ocidental e faz limite com o estado do Amazonas, ao norte e nordeste; com o Mato Grosso, a leste e sudeste; a noroeste com o Acre; e a oeste com a República da Bolívia. Ocupa 4,5% da Amazônia Legal, com área de 237.765,376 km<sup>2</sup>, dividido em 52 municípios. Sua população, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para 2017, foi de 1.805.788 habitantes.

**Figura 1** – Área de estudo com destaque para as rodovias federais e perímetros urbanos



Fonte: Elaborado pelos autores (2018).

Além do exposto, e tendo em vista a importância de alguns temas para a modelagem dinâmica, observou-se a caracterização básica do uso e da cobertura da terra, os tipos de solos, as áreas especiais, o relevo e a malha viária. Desse modo, em Rondônia, identificam-se três grandes biomas: os pantanais, junto aos rios Guaporé e Mamoré; os cerrados, localizados na porção centro sul; e as florestas, que são encontradas nas demais regiões (SANTOS, 2014).

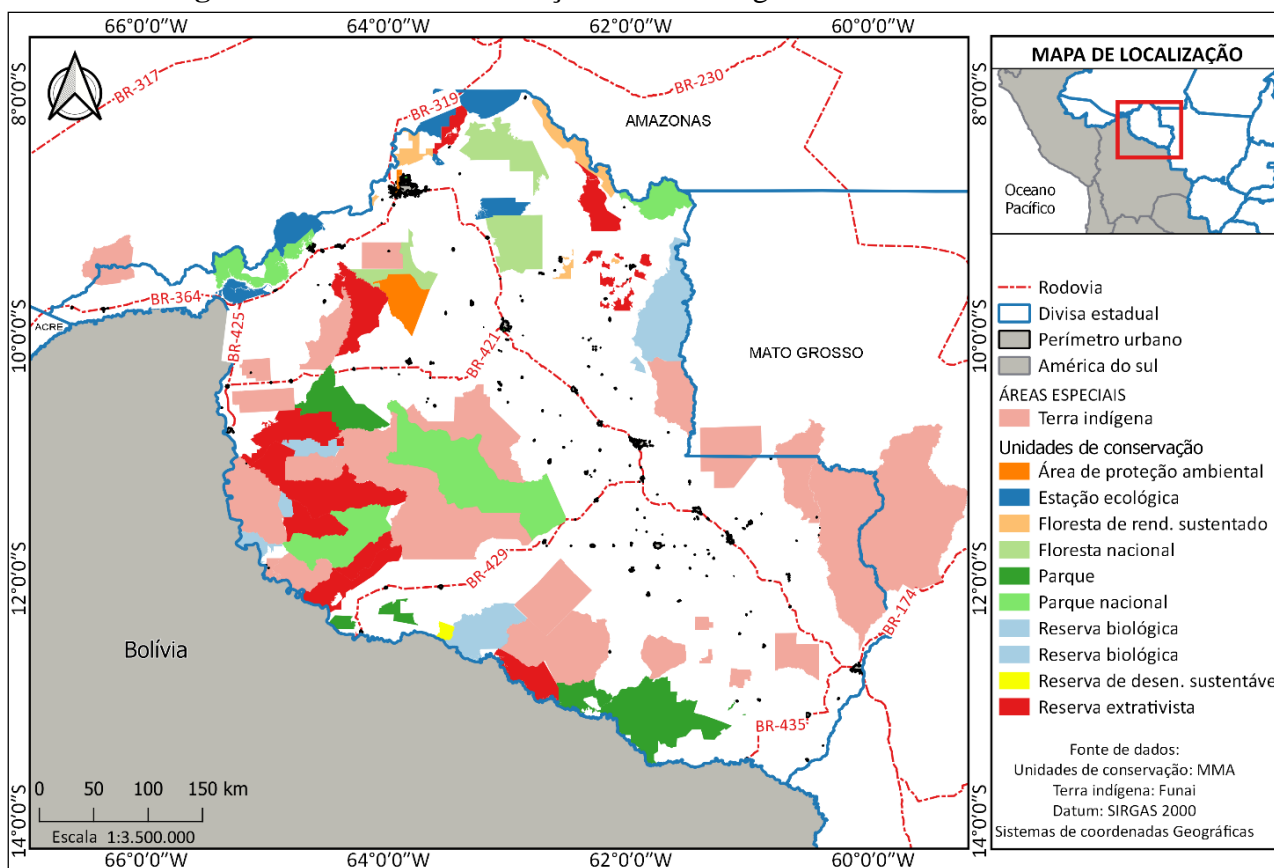
A vegetação predominante é composta por Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Densa, Savana e Formações Pioneiras de Influência Fluvial (PIONTEKOWSKI *et al.*, 2014). Segundo o IBGE (2012), a principal fitofisionomia, a Floresta, caracteriza-se pelo adensamento de árvores altas, com redução da quantidade de luz que chega ao solo, o que limita o desenvolvimento das sinúsias herbácea e arbustiva.

De acordo com ICMBio (2009), o clima é do tipo Tropical Úmido, marcado pelas temperaturas elevadas durante todo o ano, com pequena amplitude térmica anual. As temperaturas

médias anuais variam entre as temperaturas máximas, chegando aos 32°C no Norte (município de Porto Velho) e aos 29°C no Sul (município de Vilhena), e as mínimas, que variam entre 18° a 21°C no norte do estado e 16° a 20°C no sul. A pluviosidade é outra característica marcante desse tipo climático, em que os meses de junho, julho e agosto são marcados pela baixa pluviosidade ou, até mesmo, pela total ausência de chuvas (ICMBio, 2009).

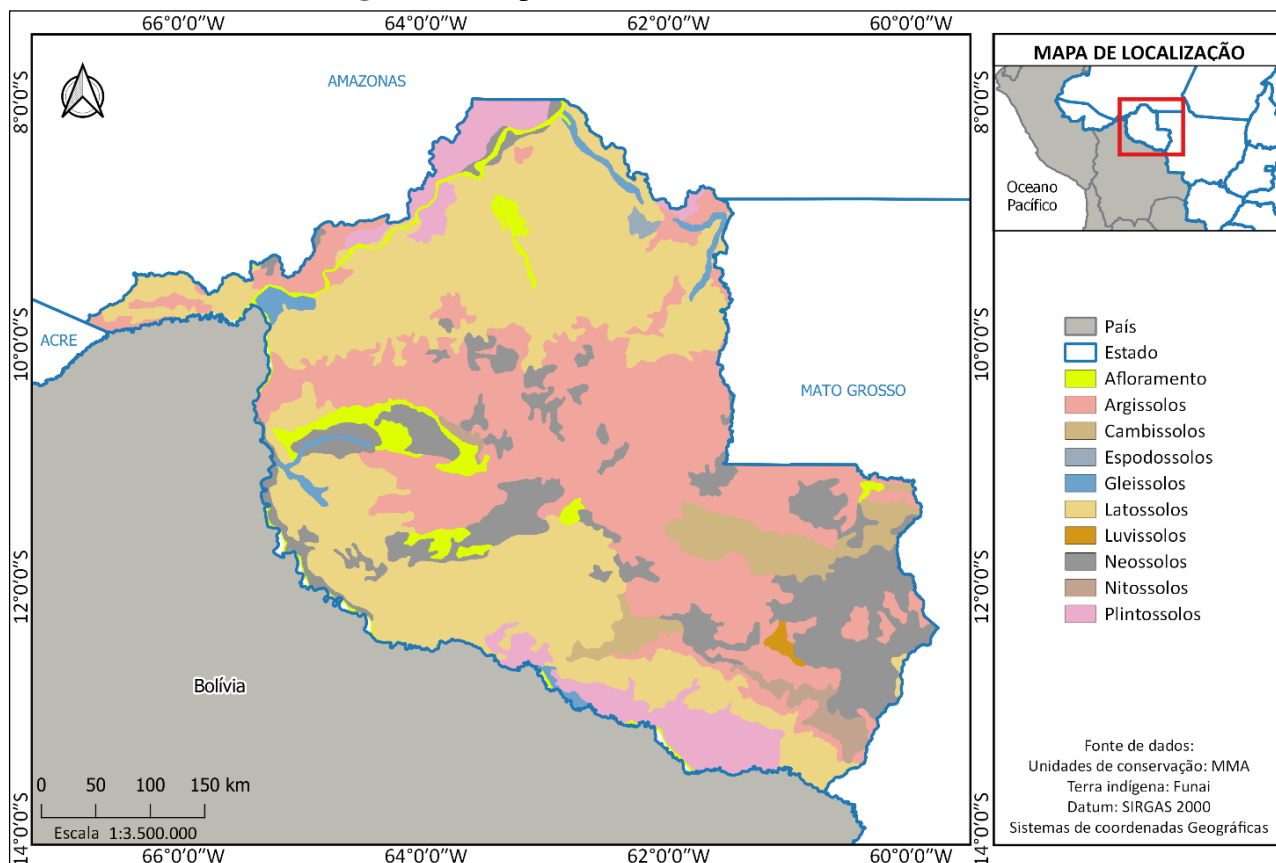
As áreas especiais (Figura 2) do tipo terra indígena ocupam parte das áreas de 26 municípios e juntas possuem uma superfície de 5.0618,38 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 21,3% da área do estado de Rondônia. As Unidades de Conservação (UCs) de Proteção Integral e Uso Sustentável, federais e estaduais, juntas ocupam 48.528,23 km<sup>2</sup>, o que correspondeu a 20,4% (SANTOS, 2014). Observa-se a partir dessa Figura 2 que as áreas especiais se concentram na porção sudoeste e as terras indígenas nas áreas limítrofes do estado.

**Figura 2** – Áreas de conservação e terras indígenas no estado de Rondônia



**Fonte:** Elaborado pelos autores (2018).

Segundo a Embrapa (2011), no estado de Rondônia, foram mapeados nove tipos de solos (Figura 3): Latossolos (39,9%), Argissolos (31,12%), Neossolos (13,93%), Plintossolos (6,33%), Cambissolos (4,04%), Gleissolos (1,41%), Nitossolos (1,25%), Luvisolos (0,23%) e Espodossolos (0,2%). Pode-se notar que alguns tipos de solos são predominantes no estado de Rondônia, sendo os Latossolos com 38,90%, os Argissolos com 31,12% e os Neossolos com 13,93% de predominância.

**Figura 2** – Mapa de solos do Estado de Rondônia

**Fonte:** EMBRAPA, 2011. **Elaboração:** os autores (2018).

A malha viária soma aproximadamente 45.073,10 km, em que se destaca o eixo principal, rodovia federal BR-364, eixos secundários, rodovias federais 399, 421, 425 e 429. O relevo de Rondônia apresenta altitudes que variam de 9 m a mais de 1.040 m e declividades estimadas que variam de 0 a 60 graus (PIONTEKOWSKI *et al.*, 2014).

### 3. METODOLOGIA

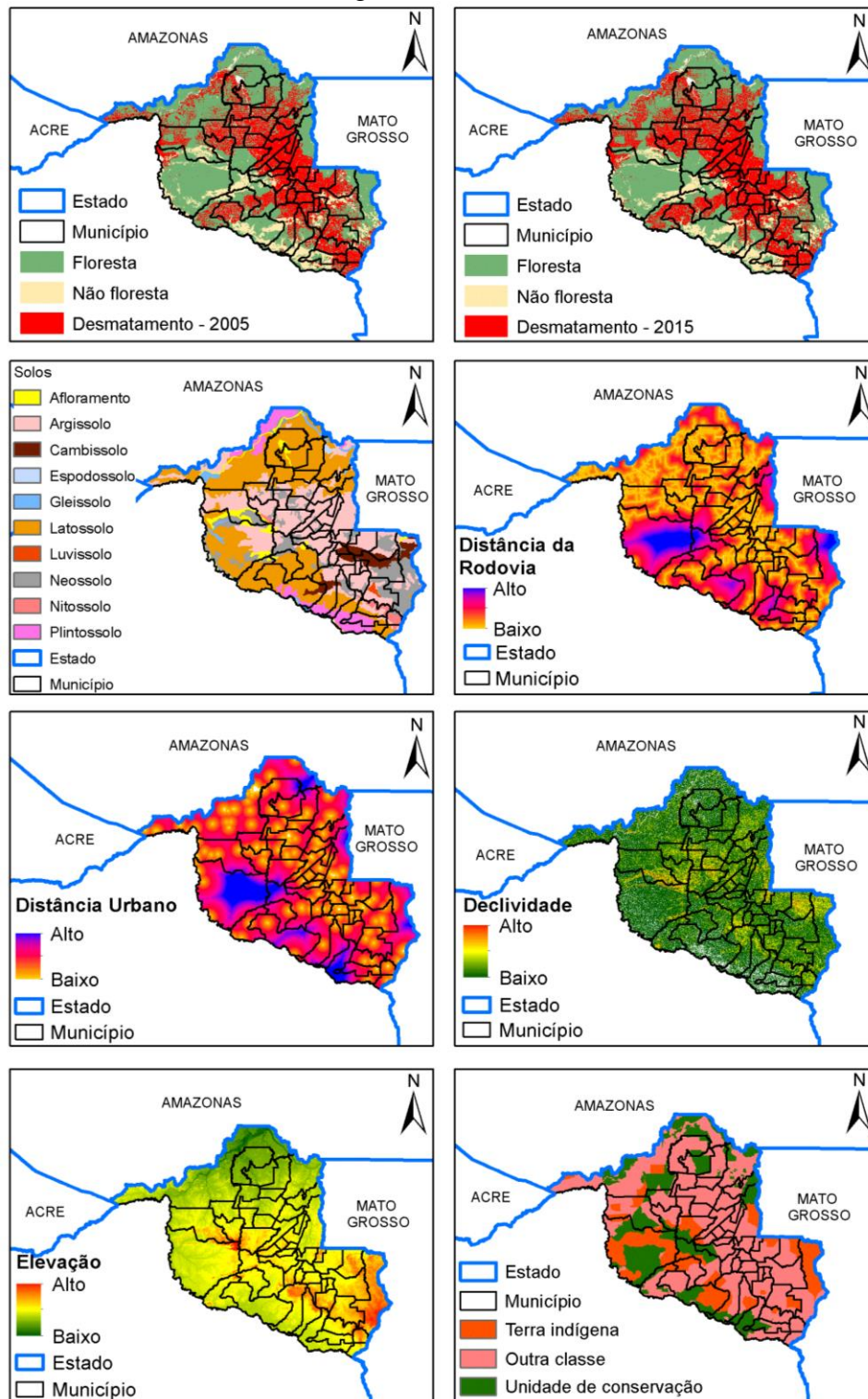
O processo de modelagem dinâmica dos desmatamentos foi elaborado por meio da utilização do programa DINAMICA EGO, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como suporte à modelagem ambiental multivariada e não linear, baseado em autômato celular (SOARES FILHO *et al.*, 2003). O sistema consiste num arranjo n-dimensional de células, em que cada célula representa a possibilidade de conversão de um estado (Tempo 1) para outro estado (Tempo 2) no cenário, de acordo com sua condição prévia e arranjo espacial das células vizinhas, por meio de um conjunto de regras de transição (SOARES FILHO *et al.*, 2003).

Os sistemas aplicados à modelagem da dinâmica da paisagem, de modo geral, necessitam inicialmente de dados de entrada, sendo um mapa inicial e final da paisagem e dados mapas determinantes (evidências) (LIMA *et al.*, 2013). A partir dos mapas, inicial e final, os sistemas de modelagem da paisagem, estimam uma mudança e, juntamente como os mapas determinantes, calculam a probabilidade dessa mudança, utilizando métodos estáticos (LIMA *et al.*, 2013).

Desse modo, foram considerados como dados de entrada (Figura 4) os arquivos vetoriais das áreas desmatadas, dos tipos de solos, das áreas especiais, da malha viária, das áreas urbanas, o cálculo da distância das rodovias e das áreas urbanas e os dados raster de declividade e elevação. Os dados vetoriais das áreas desmatadas dos anos de 2005 e 2015 foram obtidos do projeto PRODES, que os

obtem a partir do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Os dados dos tipos de solos foram obtidos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2000). As áreas espaciais do tipo Unidades de Conservação foram obtidas do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO) e as áreas especiais do tipo Terra Indígena foram obtidas da Fundação Nacional do Índio (FUNAI) (2020).

**Figura 4** – Espacialização da conversão vetor para raster dos dados de entrada utilizados na modelagem de desmatamento



**Fonte:** Elaborado pelos autores (2018), com base nos dados referidos na Tabela 1, a seguir.

Os arquivos vetoriais da malha viária foram obtidos do módulo do QGIS *OSM Downloader*, que é uma base colaborativa, em que os usuários compartilham informações espaciais. O cálculo da distância das rodovias e das áreas urbanas foi executado sobre o arquivo vetorial do TERRACLASS, por meio da ferramenta *proximity (Raster distance)* no QGIS.

Os dados do TERRACLASS qualificam o desmatamento na Amazônia Legal Brasileira, ao fornecer o detalhamento das formas de uso e da cobertura da terra nessa região. Os dados *raster* de declividade e elevação foram obtidos mediante a manipulação do Modelo Digital de Elevação disponibilizado pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, disponível pela EMBRAPA (2000), as fontes descritas as fontes na Tabela 1. A base de dados foi organizada no QGIS, que é um *software* de Sistema de Informação Geográfica gratuito e de código livre.

**Tabela 1** – Descrição dos dados utilizados na modelagem dinâmica com respectivas fontes

Informações obtidas	Fonte
Uso e cobertura da terra	PRODES
Tipos de Solos	EMBRAPA
Área especial do tipo Unidade e Conservação	ICMBio
Área especial do tipo Terra Indígena	FUNAI
Malha viária	<i>OSM Downloader</i>
Áreas urbanas	TERRACLASS
Modelo digital de elevação - Altimetria e declividade	NASA

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Os dados de entrada da pesquisa são considerados variáveis “explicativas”, pois são parâmetros que possuem uma alta correlação para promover os desmatamentos. Nesta pesquisa, foram criados dois grupos de dados: Fisiográficos (altimetria, declividade e tipos de solos) e Antrópicos (distância das rodovias, distâncias das áreas urbanas, áreas de conservação e terras indígenas).

Além disso, a Tabela 2 revela os tipos das variáveis utilizadas (evidências) e a Tabela 3, os parâmetros para o cálculo dos pesos na modelagem de cenários futuros.

**Tabela 2** – Tabela das variáveis de evidências

Variáveis de evidências	Tipo
Distâncias das áreas desmatadas	Dinâmica
Distâncias dos centros urbanos	Dinâmica
Distância das rodovias	Dinâmica
Declividade	Estática
Elevação	Estática
Tipos de solos	Estática
Unidade de conservação / Terras indígenas	Estática

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

**Tabela 3** – Parâmetros para os cálculos dos pesos

Nome da variável	Catégorica	Incremento	Delta máx.	Delta mín.	Ângulo tolerância
Dist. áreas desmatadas	Não	120	500	1	5,0
Dist. centros urbanos	Não	120	500	0	5,0
Dist. rodovias	Não	120	500	0	5,0
Declividade	Não	1	500	0	5,0
Elevação	Não	10	500	0	5,0
Tipos de solos	Sim	-	500	0	5,0
Áreas especiais	Sim	-	500	0	5,0

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

As variáveis “distância das áreas desmatadas”, “distância das rodovias” e “distância das manchas urbanas” foram definidas como dinâmicas, devido às suas distâncias alterarem o peso de influência, para que uma área tenha um potencial de desmatamento. Já as variáveis “Declividade”, “Elevação”, “Tipos de solos” e “Unidade de conservação” foram consideradas estáticas, pois não há alteração durante o processo de simulação de áreas desmatadas.

Os valores dos pesos das variáveis “Tipos de solos” e “Unidades de conservação/Terras indígenas” foram classificadas como “Categórica”, devido somente a essas serem as variáveis descritivas, ou seja, possuem classe.

Após a seleção dos dados, foi realizada a conversão vetor para *raster*. A Figura 4 revela essa etapa.

Além do exposto, destaca-se o fato de que a área total de desmatamento projetada foi relacionada com os próximos anos (até 2050), por meio da análise de correlação do atributo tempo e atributo área desmatada e o seu respectivo coeficiente de determinação ( $r^2$ ). O coeficiente de determinação expressa o quanto a variável independente (tempo entre 2015 e 2050) explica a variável dependente (estimativa de área desmatada), ou seja, quanto maior o tempo, mantendo o ritmo de desmatamento, maior será a área desmatada.

### 3.1. Etapas de processamento – DINAMICA EGO

O processamento no DINAMICA EGO (Figura 5) seguiu oito etapas. A etapa 1 agrupou atividades de organização da base de dados, já referidas, os tratamentos necessários, inclusive de normalização das linhas e colunas de todas as variáveis em evidência. Ainda sobre a etapa 1, já com o arquivo raster, realizou-se a conversão da resolução espacial para 120 metros, já que essa era a resolução do dado de entrada tipos de solo, sendo isso necessário para a padronização, pois o programa DINAMICA EGO necessita que todos os dados de entrada tenham a mesma quantidade de linhas e colunas.

A etapa 2 da modelagem da dinâmica da paisagem entre o estado inicial (Desmatamento de 2005) e final (Desmatamento de 2015) ocorreu por meio da função *Determine Transition Matrix*. A partir dessa ferramenta, foram geradas duas matrizes, a matriz de transição anual (*Multiple Step*) e a matriz de transição global (*Single Step*). A matriz de transição anual retrata o processo de mudança entre as classes ocorridas a cada passo de tempo (ano) do período analisado e a matriz de transição global informa a mudança entre as classes durante todo o período de análise. Os arquivos de entrada utilizados nesse cálculo foram as imagens de tempo inicial (2005) e final (2015). A função precisa como parâmetro o tempo: neste trabalho foram definidos 10 anos.

O objetivo da terceira e quarta etapas da metodologia foi calcular as faixas das distâncias das variáveis de evidências e os seus pesos na influência da expansão do desmatamento. As faixas e os pesos são calculados internamente pelo DINAMICA EGO. Segundo Ximenes *et al.* (2008), a variável “distâncias às áreas desmatadas” foi fundamental em seu estudo para a simulação dos processos de desmatamento que se observam nas fronteiras limítrofes de áreas em que já ocorreu a supressão da floresta.

Após a criação dos pesos das variáveis de evidência (Etapa 3 e 4), foi feito o cálculo das probabilidades de transição (Etapa 5). Entre as classes, empregou-se o uso dos dados de desmatamento inicial (2005) e final (2015). Segundo Delaneze *et al.* (2014, p. 477), “este cálculo é realizado através da aplicação de razões de probabilidade, que descrevem como provavelmente uma alteração na classe irá ocorrer no caso de a evidência estar presente ou ausente, conforme as equações (2) e (3)”.

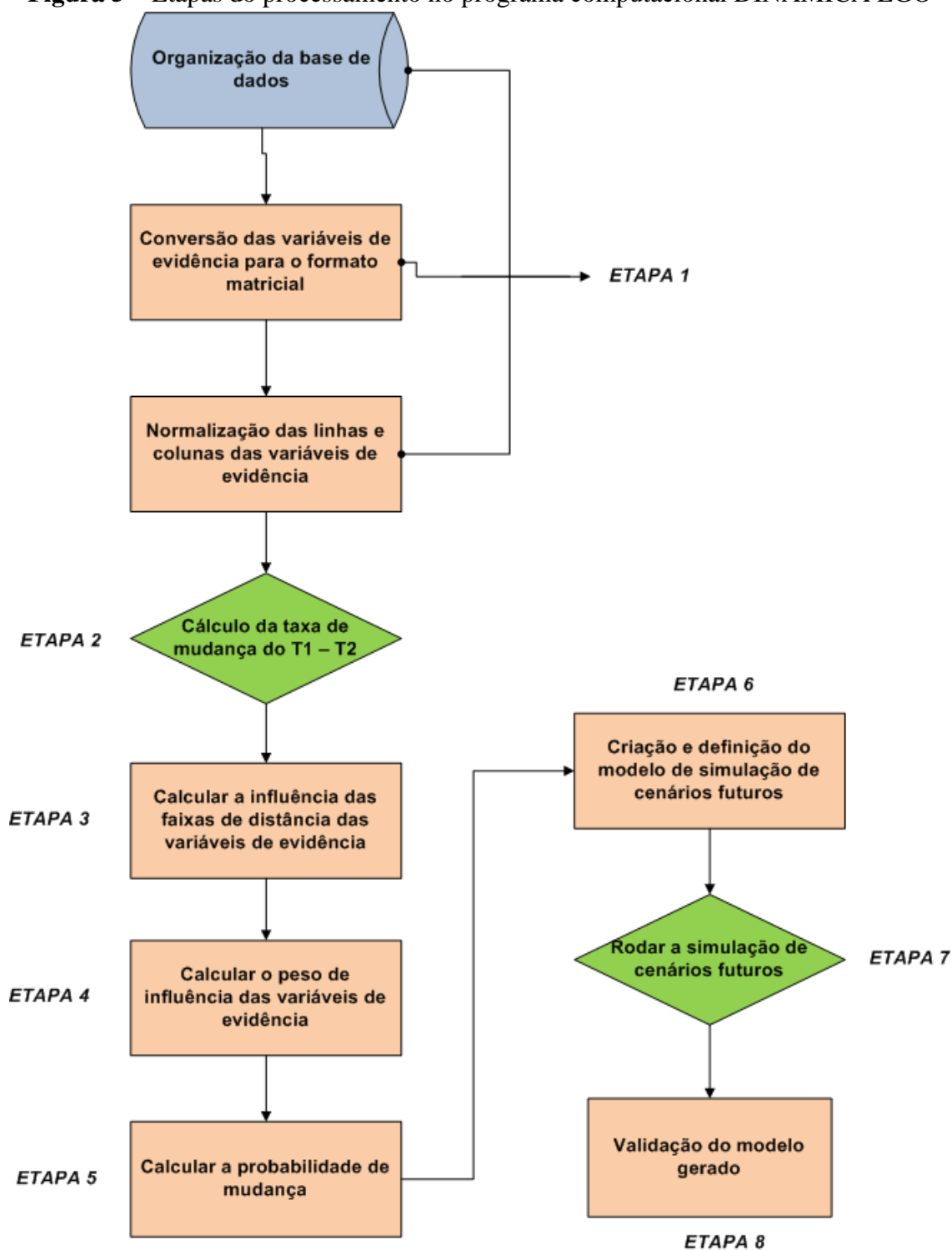
$$W^+ = \log_e \left\{ \frac{P(B|D)}{P(B|\bar{D})} \right\} \quad (2)$$



$$W^- = \log_e \left\{ \frac{P(\bar{B}|D)}{P(\bar{B}|\bar{D})} \right\} \quad (3)$$

Onde  $\log_e$  é o logaritmo natural,  $P$  é a probabilidade,  $B$  e  $\bar{B}$  são a presença ou ausência, respectivamente, da evidência preditiva, e  $D$  e  $\bar{D}$  representam, respectivamente, a presença ou ausência da classe de cobertura da terra. Com o mapa de probabilidade pronto, definiram-se as funções para execução do modelo da dinâmica do desmatamento no estado de Rondônia.

**Figura 5** – Etapas do processamento no programa computacional DINAMICA EGO

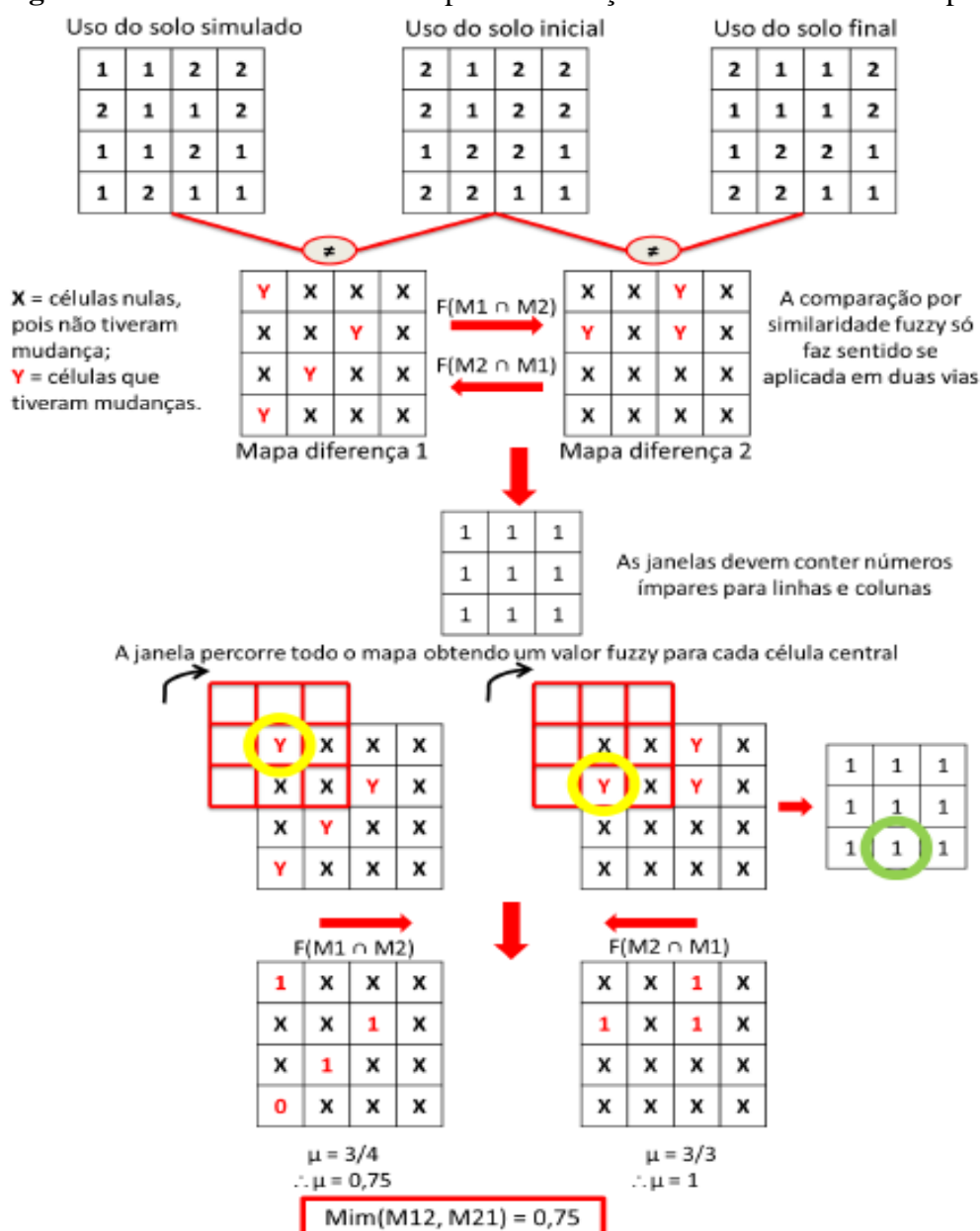


**Fonte:** Elaborado pelos autores (2018) a partir do fluxo metodológico do DINAMICA EGO.

As funções utilizadas no modelo foram *Expander e Patcher* e tiveram o objetivo de alocar espacialmente as novas mudanças entre as classes ‘Floresta’ e ‘Desmatamento’. A função *Expander* é responsável por registrar áreas convertidas de ‘Floresta’ para Desmatamento, e a função *Patcher* cria novas áreas (manchas) de transição separadas das áreas já ocupadas, sendo executada 35 vezes (35 anos) e referência a quantidade de períodos de simulação (Etapa 7).

A validação da simulação das áreas desmatadas foi feita em 2 partes: a primeira consistiu em verificar o modelo simulado com o mapa de referência (mapa do desmatamento em 2015), por meio do método de decaimento constante que incide um contexto de similaridade da vizinhança local do pixel analisado (HAGEN, 2003), conforme a Figura 6. Nessa análise local, foram utilizadas janelas do tamanho de 1L x 1C até 13L x 13C. Na segunda parte da validação, foi gerada uma análise de concordância entre os dados por meio do índice *Kappa*, que consiste em medir a concordância real menos a concordância por chance, ou seja, verificar o quanto a classificação ou simulação está de acordo com o dado de referência (FIGUEIREDO; VIEIRA, 2007).

**Figura 6** – Método de decaimento para verificação de similaridades de mapas



Fonte: Elaborado pelos autores a partir da modelagem no DINAMICA EGO.

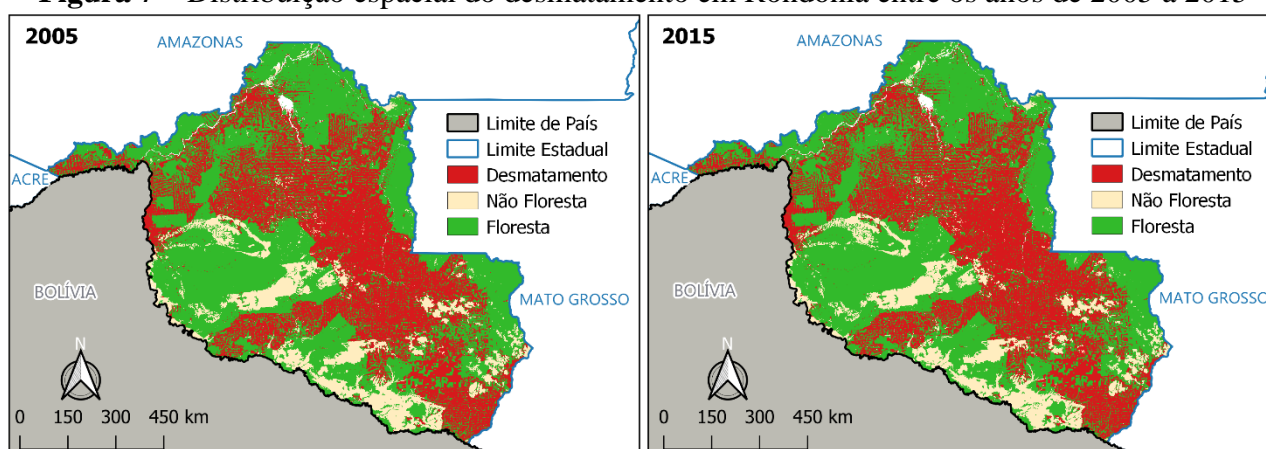
Na análise do índice *Kappa* dos 1000 pontos gerados de forma aleatória em todo o estado, o valor adquirido foi de 0,79, o que, segundo a classificação desse índice, é considerado uma exatidão "muito boa", conforme a escala proposta por Fonseca (2000).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Cenário atual do desmatamento no Estado de Rondônia

De acordo com os dados do PRODES (Figura 7), a área de desmatamento no estado de Rondônia passou de 80.443,5 km<sup>2</sup>, em 2005, para 89.577,7 km<sup>2</sup>, em 2015, com taxa de crescimento de 1% anual, ou seja, 10% durante todo o período analisado. A área total desmatada até 2015 correspondeu aproximadamente 37,68% da área territorial do estado de Rondônia. As áreas especiais foram, nesse cenário atual, determinantes para a conservação da floresta e das savanas.

**Figura 7** – Distribuição espacial do desmatamento em Rondônia entre os anos de 2005 a 2015



Fonte: dados do PRODES (2015).

A partir da análise da distribuição espacial das áreas desmatadas, observou-se que as ocorrências de frentes de expansão do desmatamento foram mais próximas das rodovias, tanto federais, estaduais e vicinais, conforme descrito por Santos (2014).

Assim, conforme Silva (2007), a infraestrutura rodoviária tem uma forte influência sobre os desmatamentos nos estados da Amazônia, especialmente Rondônia e Pará. Além disso, de forma geral, Rodrigue, Comtois e Slack (2006), o transporte representa uma das atividades humanas mais importantes em todo o mundo, sendo um componente indispensável da economia e desempenha um papel importante nas relações espaciais entre locais. Segundo Castilho (2014), os transportes, seus sistemas, redes e fluxos desempenham funções estratégicas no conjunto dos sistemas produtivos e têm protagonismo na organização de territórios.

O resultado em porcentagem da taxa de transição anual e transição global em 10 anos da classe floresta para classe de áreas desmatadas, obtida dos arquivos vetoriais do PRODES, foi de 1,15% anual e de 10,64% para taxa de transição global. Assim, os resultados obtidos pelo DINAMICA EGO da transição anual e global de áreas de desmatamento ficaram similares aos dados calculados de áreas desmatadas pelo projeto PRODES, mostrando uma coerência da modelagem.

A Tabela 3 mostra que as variáveis "Tipos de solos" e "Unidades de conservação/Terras indígenas" foram classificadas como "Categórica", devido somente a essas serem as variáveis descritivas, ou seja, possuem classe. O incremento é a representação da quebra de intervalo sobre cada variável, em que a maioria teve o valor do tamanho do pixel de 120 metros, exceto a "Declividade" e a "Elevação", aos quais foram atribuídos valor 1 ao incremento, que verifica o peso

a cada 1% de declividade, e valor 10, para verificar o peso a cada 10 metros de altitude, respectivamente.

Já os deltas são os intervalos da distância das variáveis para o cálculo do peso (Tabela 3). Ao serem criados os parâmetros para as variáveis, o programa definiu o valor padrão do ângulo de tolerância, que é o desvio do ângulo a partir de uma linha reta. Após analisar os pesos de influência das variáveis na conversão de áreas desmatadas, as que mais influenciaram foram: distância das rodovias (como maior influência até 1,2 km), distância das áreas já desmatadas (com maior influência até 240 m) e a distância dos centros urbanos (influência até 7,4 km), sendo esses intervalos superiores ao valor 1.

#### 4.2. Validação do modelo simulado

A seguir, a Tabela 4 apresenta os valores de similaridades entre o mapa de referência e o modelo simulado entre as janelas de vizinhança 1 x 1 até 13 x 13 por meio do método de decaimento por similaridade de *fuzzy*. De acordo como os valores da tabela 4, a análise, comparada célula a célula, teve uma média de 33% de similaridade entre o mapa de referência com o mapa simulado. Já na janela 5 x 5, que representa uma resolução espacial de 600 m, obteve uma similaridade média de 62,5% (mínimo de 44% e máximo, 81%). De acordo com Piontekowski *et al.* (2014), o valor de similaridade acima de 50%, com janela 5 x 5 de resolução, indica que o resultado pode ser considerado satisfatório, desde que os padrões de distribuição espacial do fenômeno sejam similares no mapa de referência com o mapa simulado.

**Tabela 4** – Porcentagem de similaridade entre o ano de 2015-PRODES e o ano de 2015 - Simulado

Janela ColxLin	Similaridade mínimo	Similaridade máximo
1x1	28%	38%
3x3	37%	64%
5x5	44%	81%
7x7	49%	90%
9x9	53%	94%
11x11	57%	97%

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Nota-se que, quando o valor da janela aumenta, os valores de similaridade mínimo e máximo também aumentam, em um certo momento os valores de similaridade tornam-se próximos, como pode ser observado nas janelas 9 x 9 e 11 x 11, o que indica certa insuficiência de avaliação de ajuste entre a referência e o simulado (XIMENES *et al.*, 2008).

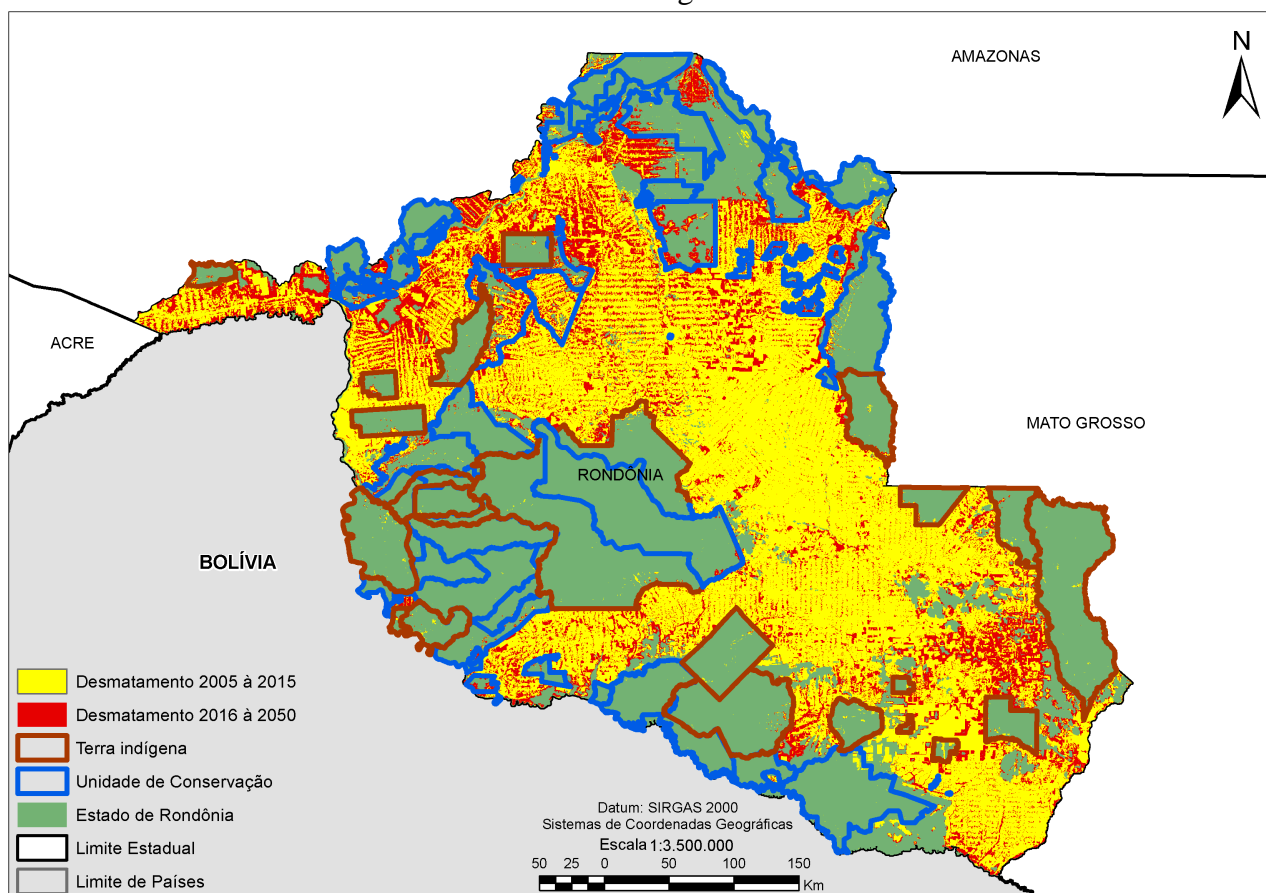
#### 4.3. Cenário futuro do desmatamento

A Figura 8 mostra as áreas desmatadas até o ano de 2050, obtidas pela simulação empregada neste trabalho. Desse modo, nos anos de 2005 a 2015 houve 37,67% do desmatamento no estado, portanto a área em vermelho (desmatamento até 2050) resultará em uma área de aproximadamente 54,87% no estado. Segundo Ferreira *et al.* (2005), o processo de desmatamento inicia-se com a abertura de rodovias oficiais ou vicinais que favorecem a expansão humana e a ocupação de forma irregular dessas áreas, destinadas à exploração de madeira e à prática de agropecuária.

A partir do mapa de projeção da retirada da vegetação, para o ano de 2050, é possível constatar que a retirada da vegetação será maior na porção noroeste, especialmente no município de Porto Velho e pressionará os recursos naturais em terras indígenas e unidades de conservação. Nesse sentido, Santos e Gomide (2015, p. 432) afirmam que a conversão das florestas é financiada pelo “o Estado Nacional, por meio dos seus bancos, que também financia inúmeras fazendas de pecuária no

entorno das Terras Indígenas em Rondônia e levam à concentração da matriz econômica sobre essa atividade”.

**Figura 8** – Modelagem dinâmica de áreas desmatadas de 2005 a 2050 e relação com as UCs e Terras Indígenas



Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

Esse dado é coerente com o cenário passado e presente, já que, segundo dados do INPE (2017), o município de Porto Velho é o que possui a maior área desmatada do estado de Rondônia. Além disso, os municípios de Porto Velho e Nova Mamoré possuem os maiores rebanhos bovinos do estado e também as duas maiores taxas de crescimento do número de animais na última década (2005-2015), com variação de 54,8% em Porto Velho e de 107,2% em Nova Mamoré (IBGE, 2017b). O aumento do número de bovinos pressiona a abertura de novas áreas, forçando ainda mais a pecuarização em Rondônia.

Ainda pelos resultados (Figura 8), na porção centro sul destaca-se outra área em que se projeta a retirada da vegetação de 2016 a 2050. Essa área localiza-se sobre relevos planos, em áreas de savanas, de fácil mecanização e sobre influência das atividades de cultivo de grãos, especialmente a soja. Segundo Soares (2009), a cultura da soja foi introduzida em Rondônia nos anos de 1990, assumindo caráter empresarial na safra de 1998, praticamente concentrada nos municípios de Vilhena e Cerejeiras. Mais recentemente observou o avanço das áreas de cultivo de soja nas áreas na planície do rio Guaporé, considerada a mais nova fronteira agrícola de Rondônia (SANTOS, 2014).

O cultivo de soja em Rondônia tornou-se economicamente viável e se beneficiou da redução do custo de escoamento da produção, que deixou de ocorrer para as regiões sul e sudeste, via terrestre, passando a ser escoada pela hidrovía Madeira-Amazonas até Santarém no Pará. Nesse sentido, “a partir de 1997, a Hidrovía Madeira-Amazonas passou a interligar os portos de transbordos de soja dos grupos Maggi e Cargill (agentes hegemônicos), conectando a cidade de Porto Velho à Itacoatiara,

no Amazonas, e à Santarém, no Pará” (SILVA, 2014). Além disso, para o autor, o espaço rural foi alterado com maior avidez, uma vez que a substituição das economias extrativista e camponesa pela agricultura empresarial instaurou na região o uso capitalista da terra, com a mercantilização da terra e da natureza.

Assim, os grupos hegemônicos do agronegócio oferecem a semente e se comprometem com a aquisição após colheita. Contudo, romper com a pecuária, uma prática enraizada no modo de produção do estado, não é algo que ocorrerá “do dia para noite”, pois também os frigoríficos dão seus incentivos. Portanto, o que se vê é uma conversão no modo de ocupação de forma consorciada, em que áreas servem à pecuária e à agricultura. O mais acertado nesse conflito de interesses é que qualquer uma das atividades gerará maior pressão sobre a floresta, as unidades de conservação e as comunidades remanescentes de Rondônia. Dessa forma, a soja tornou-se o produto agrícola mais valorizado de Rondônia e foi capaz de inserir o sudoeste amazônico no mapa dos novos espaços tecnificados da agricultura moderna de exportação (PEREIRA; KAHIL, 2010).

A seguir, a Tabela 5 revela as projeções alcançadas pelo modelo de simulação dos desmatamentos até o ano de 2050. Nesse sentido, a média do desmatamento a cada 10 anos é acima de 4%. Seguindo-se essa projeção, em mais 30 anos, o estado terá uma área total de mais de 65% do seu território desmatado.

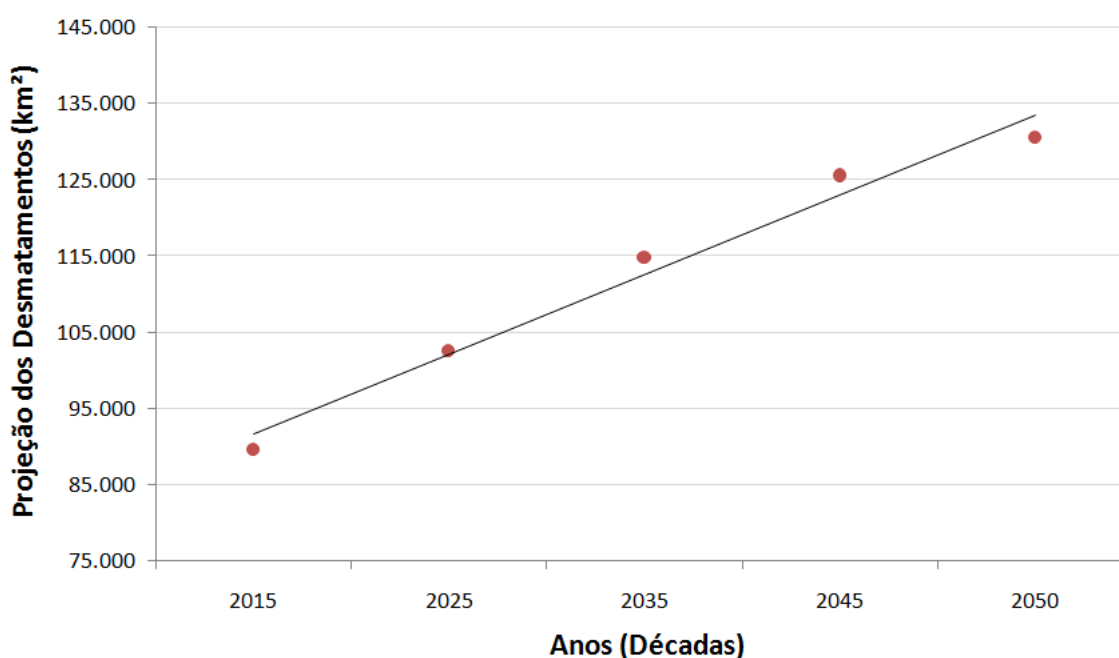
**Tabela 5** – Projeção dos valores de áreas desmatadas no Estado de Rondônia

Área desmatada - PRODES (km <sup>2</sup> )		Área desmatada simulada (km <sup>2</sup> )			
2005	2015	2025	2035	2045	2050
80.443,50	89.577,70	102.474,62	114.681,93	125.509,54	130.458,53
33,83%	37,67%	43,10%	48,23%	52,79%	54,87%

Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise de correlação resultou em  $r^2$  igual a 0,978 ( $r^2 = 0,98$ ), revelou que, mantendo o ritmo de desmatamento no período de análise, maior será a área desmatada. Ou seja, 98% da variação da área do desmatamento é explicada pelo decorrer dos anos. Quer dizer que, caso não mude as ações no presente, há grande possibilidade de esses resultados se tornarem realidade.

**Figura 9** – Regressão linear simples entre o período de tempo analisado e a estimada de áreas desmatadas



Fonte: Elaborado pelos autores.

Além disso, as áreas especiais, as terras indígenas e as unidades de conservação já vem sendo pressionadas por projetos que buscam ampliar as possibilidades de integração da região Amazônica à infraestrutura regional, especialmente com a Bolívia e o Peru, com saída para o Pacífico. Nesse sentido, destaque é dado para o projeto de implantação da Estrada Transrondoniense, que o governo do estado de Rondônia anuncia como a “Rodovia do desenvolvimento e da riqueza”, a qual é projetada como alternativa à BR-364 e que fará a ligação da porção Sul de Rondônia à porção oeste, num percurso de cerca de 700 quilômetros (SANTOS, 2014).

Outro projeto de integração regional se efetiva com a implantação da rodovia federal BR-421, que junto com a rodovia federal BR-364 tem o objetivo de ligar o município de Ariquemes à Guajará-Mirim, divisa com a Bolívia. Essa rodovia foi construída a partir de incentivos financeiros diretos de madeireiros, e isso fez com que ela fosse aberta em uma área de proteção ambiental, o Parque Estadual de Guajará-Mirim, nas proximidades de quatro terras indígenas, Karipuna, Igarapé Ribeirão, Igarapé Lage e Uru Eu Wau Wau (FEARNSIDE; FERREIRA, 1984). Segundo Borges (2012), a região onde se encontra localizada a rodovia federal BR – 421 era a área de maior nível de conservação ambiental do estado nos idos dos primeiros anos do século XXI, ao mesmo tempo que configura ainda hoje uma das áreas mais conflituosas devido a diversas invasões em áreas protegidas.

Após 30 anos de abertura, essa rodovia estava, no ano de 2014, em pouco uso, pois ela encontrava-se interditada pelo Ministério Público Federal em Rondônia. Contudo, com a enchente do rio Madeira no ano de 2014, a BR-421 voltou a ser utilizada, sob o argumento de que era a única alternativa de ligar os municípios localizados juntos ao eixo da BR-364 aos municípios de Guajará-Mirim e Nova Mamoré, os mais afetados pela cheia do rio Madeira.

Assim, o governo federal pressionou para a abertura da rodovia BR-421 no ano de 2014 (SANTOS, 2014). Isso ocorreu mediante uma manobra do estado de Rondônia, que apresentou um traçado “alternativo”, denominado Estrada Parque (rodovia estadual 420). Foi uma estratégia dos poderes, político e econômico local, para burlar a proibição imposta pela justiça federal às obras da rodovia federal BR-421. O fato é que a Estrada Parque ou rodovia estadual 420 tem o mesmo traçado da rodovia 421 e sua obra foi autorizada no ano de 2015, fato que impulsionou o fluxo de pessoas em busca de terras baratas e de recursos naturais abundantes, propiciando, assim, o aumento da pressão antrópica sobre as Terras Indígenas e as Unidades de Conservação ao longo dessa rodovia (SANTOS, 2014).

Além do exposto, é reconhecido que as áreas já desmatadas influenciam na estimativa do desmatamento, pois contribuem para expansão da fronteira agropecuária. Nesse sentido, segundo Fearnside (2006), em geral, os grandes e médios fazendeiros respondem pela grande maioria da atividade do desmatamento. Contudo, ainda segundo o autor, os pequenos agricultores também podem atuar como forças importantes nos lugares onde estão concentrados. Esses atores certamente encorajam novos empreendimentos agropecuários ao criar condições e infraestrutura, mesmo que precárias, para a circulação de pessoas e de produtos.

Por fim, segundo Ximenes *et al.* (2008), os modelos computacionais de simulação são alvos de críticas, principalmente em vista do seu reducionismo e suas limitações para capturar integralmente a complexidade inerente da realidade. Contudo o autor explica que esses modelos oferecem uma maneira incomparável de abstrair padrões e tendências de processos do mundo real. Nesse sentido, Almeida (2005) apud Ximenes *et al.* (2008) afirma que os modelos de simulação devem ser propostos, manipulados, aplicados e interpretados de forma sábia e crítica, de modo que pesquisadores, planejadores e tomadores de decisão da esfera pública e privada possam extrair o melhor de seus resultados e sensatamente reconhecer os seus limites.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados, constata-se que o desmatamento continua e continuará ocorrendo devido ao modelo de desenvolvimento econômico de Rondônia, apesar de reconhecidos avanços nas

políticas públicas de implantação de unidades de conservação e demarcação de terras indígenas. Fearnside (2012) chama a atenção para o fato de que, no processo de tomada de decisão no Brasil, as obras que têm grande prioridade política são conduzidas por processo decisório similar ao da época militar, isto é, sem considerar os fatores ambientais e até mesmo, econômicos.

As variáveis de distância de rodovias e centro urbanos foram as variáveis que mais contribuíram para a área de grande probabilidade de desmatamento, pois, para criar estradas e cidades, é necessário derrubar árvores e/ou mudar a paisagem florestal para paisagem mais antrópica. Além disso, por meio dos resultados obtidos, foi possível concluir que o mosaico de áreas especiais da área de estudo possui pequenas áreas antropizadas, principalmente em algumas terras indígenas e unidades de conservação de uso integral. Assim, mesmo que as áreas especiais, as terras indígenas e as unidades de conservação sejam consideradas barreiras ao desmatamento, a fiscalização dessas áreas é fator decisivo para conter, de fato, o desmatamento ilegal no estado de Rondônia e na Amazônia. Assim, no que se refere às terras indígenas, os estudos do *Rights and Resources Initiative* (2016) revelam que essas áreas guardam 24% do carbono estocado na superfície e que têm o potencial de evitar a emissão de 31,8 milhões de toneladas anuais de CO<sub>2</sub>. Por outro lado, a Iniciativa de Integração da Infraestrutura Regional Sul-americana, que pretende desenvolver e integrar as áreas de transporte, energia e telecomunicações da América do Sul, pressionará de forma decisiva as áreas especiais no Sul da Amazônia, criando um cenário conflituoso de interesses nessa região.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, J. J. Rondônia: Colonização de Novas Terras. **Revista de Educação, Cultura e Meio Ambiente**, Porto Velho, v. 11, n. 1, p. 1-5, 1998.

BORGES, L. R. M. **Políticas Territoriais na Fronteira**: o programa de aceleração do Crescimento e as transformações em Rondônia no início do séc. XXI. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CASTILHO, D. **Modernização Territorial e Redes Técnicas em Goiás**. 2014. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CIM, S. O processo migratório de ocupação no estado de Rondônia – visão histórica. **Primeira versão**, Porto Velho, v. 7, n. 104, p. 1-12, 2003.

DELANEZE, M. E. *et al.* Modelagem dinâmica espacial para o monitoramento do crescimento urbano no entorno do Duto Orbel. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 66, n. 3, p. 473-484, 2014.

EMBPRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Shuttle Radar Topography Mission – SRTM**. Rio de Janeiro: EMBPRAPA, 2000. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/ro/ro.htm>. Acesso em: 24 jul. 2017.

EMBPRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2011.

FEARNSIDE, P. M. Os efeitos das pastagens sobre a fertilidade do solo na Amazônia Brasileira: consequências para a sustentabilidade de produção bovina. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 10, n. 1, p. 119-132, 1980.



FEARNSIDE, P. M.; FERREIRA, G. L. Roads in Rondônia: Highway Construction and the Farce of Unprotected Reserves in Brazil's Amazonian Forest. **Environmental Conservation**, Cambridgeshire, v. 11, n. 4, p. 358-360, 1984.

FEARNSIDE, P. M. Frenesi de Desmatamento no Brasil: A Floresta Amazônica Irá Sobreviver? In: KOHLHEPP, G.; SCHRADER, A. (Ed.). **Homem e Natureza na Amazônia**. Geographisches Institut – Universität Tübingen: Tübingen, Germany, 1987. p. 45-57.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônia**, Manaus, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. A tomada de decisão sobre grandes estradas amazônicas. In: BAGER, A. (Ed.) **Ecologia de Estradas: Tendências e Pesquisas**. Lavras: Editora da Universidade Federal de Lavras, 2012. p. 59-75.

FERREIRA, L. V. *et al.* O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007. Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 21-26.

FONSECA, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. São Paulo: INPE, 2000.

FUNAI - FUNDAÇÃO NACIONAL DO ÍNDIO. **Terras Indígenas**. Brasília: FUNAI, 2020. *Base cartográfica no formato shapefile*. Disponível em: <http://www.funai.gov.br/index.php/shape>. Acesso em: 04 jun. 2020.

HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, Londres, v. 17, n. 3, p. 235-249, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira: Sistema Fitogeográfico, Inventário das Formações Florestais e Campestres, Técnicas e Manejo de Coleções Botânicas, Procedimentos para Mapeamentos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Departamento de Estatística. Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Estimativas das populações residentes, em 01.07.2017, segundo os municípios**. Rio de Janeiro: 2017a. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 10 set. 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pecuária**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?lang=&sigla=ro>. Acesso em: 03 abr. 2017.

ICMBio - INSTITUTO CHICO MENDES PARA A CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Diretoria de Unidades de Conservação; Amazônia, Coordenação do Bioma**. Revisão do Plano de manejo do Parque Nacional de Pacaás Novos. Brasília: ICMBio, 2009.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Desmatamento nos Municípios do Estado de Rondônia**. Cachoeira Paulista: INPE, 2017. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>. Acesso em: 30 mar. 2017.

LIMA, T. C. *et al.* DINAMICA EGO e Land Change Modeler para simulação de desmatamento na Amazônia brasileira: análise comparativa. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 6379- 6386.

OLIVEIRA, O. A. **Geografia de Rondônia: Espaço e Produção**. Porto Velho: Dinâmica Editora e Distribuidora, 2003.

PEREIRA, M. F. V.; KAHIL, S. P. A lógica corporativa do uso do território em Rondônia: o agronegócio da soja na região de Vilhena. **Campo-Território: Revista de Geografia Agrária**, Uberlândia, v. 5, n. 10, p. 288-311, 2010.

PIONTEKOWSKI, V. J. *et al.* Avaliação do Desmatamento no Estado de Rondônia entre 2001 e 2011. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 297-306, 2014.

PRODES. **Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. Base cartográfica no formato *shapefile*. São Paulo: PRODES, 2015.

RIGHTS AND RESOURCES INITIATIVE. Woods Hole Research Center & World Resources Institute. **Toward a Global Baseline of Carbon Storage in Collective Lands: An Updated Analysis of Indigenous Peoples' and Local Communities' Contributions to Climate Change Mitigation**, 2016. Disponível em: <https://rightsandresources.org/en/global-baseline-carbon-storage-collective-lands/#.XuE0uUVKiHs>. Acesso em: 30 abr. 2017.

RODRIGUE, J.; COMTOIS, C.; SLACK, B. **The geography of transport systems**. New York: Routledge, 2006.

RODRIGUES, M. G. M. Redes transnacionais de advocacia pública: estratégias e impactos - O projeto Planaflo e o painel de inspeção do banco mundial. **Contexto Internacional**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 73-128, 2002.

SANTOS, A. M. **Cartografias dos povos e das terras indígenas em Rondônia**. 2014. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, 2014.

SANTOS, A. M.; GOMIDE, M. L. A ocupação no entorno das terras indígenas em Rondônia, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 35, n. 3, p. 417-436, 2015.

SILVA, A. de Q. Comparação dos fatores determinantes do desflorestamento nos estados do Pará, Rondônia e Amazonas. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 13., 2007, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 3133-3140.

SILVA, R. G. C. A Regionalização do Agronegócio da Soja em Rondônia. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 18, p. 298-312, 2014.

SOARES FILHO, B. S. *et al.* Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. *In: ALBERNAZ, A. L; SILVA J.*

M. C.; VALERIANO, D. (org.). **Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais**. Belém: Editora Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003. p. 74-86.

SOARES, P. R. B. A Agropecuária e a Dinâmica Regional no Estado de Rondônia: análise dos dados preliminares do censo agropecuário. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 39, n. 5, p. 29-41, 2009.

TERRACLASS. **Rondônia**. Cacheira Paulista: INPE, 2014. Disponível em: [http://www.inpe.br/cra/projetos\\_pesquisas/terraclass2014.php](http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2014.php). Acesso em: 23 mai. 2017.

XIMENES, A. *et al.* Modelagem Dinâmica do Desmatamento na Amazônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, n. 3, p.370-391, 2008.

**Data de submissão:** 29.04.2018

**Data de aceite:** 13.05.2020

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.