

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM**

**Modelagem da Dinâmica de Desmatamento a diferentes escalas
espaciais na região nordeste do estado de Mato Grosso**

Santiago Palacios Noguera

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas, área de concentração em Ecologia.

Manaus, Amazonas
2006

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM**

**Modelagem da Dinâmica de Desmatamento a diferentes escalas
espaciais na Região nordeste do Estado de Mato Grosso**

Santiago Palacios Noguera

**Orientador: Dr. Arnaldo Carneiro Filho
Co-orientador: Dr. Britaldo Soares-Filho**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas, área de concentração em Ecologia.

Manaus, Amazonas
2006

Ficha catalográfica:

P 153 Palacios Noguera, Santiago

Modelagem da Dinâmica de Desmatamento a diferentes escalas espaciais na região nordeste do Estado de Mato Grosso. / Santiago Palacios Noguera – Manaus, 2006.

106 p. : il.

Dissertação (mestrado) – INPA/UFAM, Manaus, 2006

1. Desmatamento – Mato Grosso – Simulação 2. modelo DINAMICA (programa de computador) I. Título

CDD 19. ed. 333.75

Sinopse:

Foi desenvolvido um modelo espacial para simular a dinâmica do desmatamento em diferentes escalas espaciais para a região nordeste de Mato Grosso e o município de União do Sul. Foram usados os conceitos e metodologia do programa DINAMICA para o desenvolvimento do modelo. Para as duas regiões foram simulados cenários até o ano 2025, representando diferentes ações por parte dos governos federal e estadual.

Palavras-chave: Modelagem, desmatamento, modelo DINAMICA, Mato Grosso, União do Sul, cenários futuros, Amazônia.

Keywords: Modeling, deforestation, DINAMICA model, Mato Grosso, União do Sul, future scenarios, Amazon.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Dr. Arnaldo Carneiro por todo o apoio e paciência no planejamento e elaboração desta dissertação. Durante tudo este tempo foi muito importante a sua amizade e o seu apoio na minha formação profissional e pessoal.

Agradeço ao Dr. Britaldo Soares e sua equipe pela paciência e o apoio e colaboração no treinamento para conhecer e entrar no mundo do DINAMICA.

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado, e ao INPA, pela oportunidade da formação acadêmica.

Agradeço ao Greenpeace-Brasil pelo apoio financeiro para a excursão de campo deste trabalho.

Agradeço ao Daniel Assumpção pela sua amizade e sua eterna companhia ao longo de todas as etapas deste trabalho e destes dois anos de vida no mestrado.

Agradeço ao pessoal do SIGLAB: ao Jorge Costa pela sua amizade e colaboração em tudo o que se refere ao SIG, ao Edwin pelos conselhos e discussões para esta dissertação e sua amizade, ao Ralph, Juliana, Sylvain, Márcia, Marcio, pela amizade e agradável companhia.

Agradeço aos meus amigos por tantas coisas: Anselmo, Trupico, Gabi-Saci, Sol, Dri, Tony, Maria Cecília, Nataly, Machupichu, Zé Luis, Marcela.....

Agradeço a toda minha família na Colômbia e outros locais pelo amor e apoio de sempre.



RESUMO

Dentro da Amazônia Legal brasileira o estado do Mato Grosso apresenta as maiores taxas de desmatamento concentradas em pontos críticos, e localizadas principalmente ao longo das rodovias BR 163 e BR 158. Na atualidade, estas regiões encontram-se em uma segunda fase de ocupação, na qual a rentabilidade de atividades extrativistas e agropecuárias está impulsionando a expansão e transformação da fronteira, e este processo está sendo reforçado por programas governamentais de investimento em obras de infra-estrutura. Segundo dados do projeto PRODES, a taxa de crescimento do desmatamento do Mato Grosso entre o ano 2003 e 2004 foi de 10615 km², o que corresponde a 40% do desmatamento total feito na Amazônia neste período.

Para facilitar o estudo e a compreensão desta problemática, a modelagem espacial é uma ferramenta útil que permite representar, de maneira mais simples, processos complexos como o desmatamento e simular possíveis trajetórias futuras.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo espacial para simular a dinâmica do desmatamento em diferentes escalas na região nordeste do Estado de Mato Grosso até o ano 2025, além de avaliar as respostas do desmatamento a variáveis proximais através de cenários futuros, usando a metodologia e conceitos do programa computacional DINAMICA. Este programa é um modelo de simulação espacial baseado em autômatos celulares. Para a região nordeste do Estado, foi usada uma resolução de 250 m e foram simulados três cenários: o primeiro cenário

representou as tendências históricas do desmatamento, no qual os resultados mostraram que se as tendências atuais se mantiverem, até o ano 2025, 70% da área da região nordeste de Mato Grosso estará desmatada, apresentando uma paisagem altamente fragmentada. No segundo cenário, foi representada uma ação efetiva do governo tanto federal, estadual e municipal que diminuiu em 50% a taxa anual de desmatamento na região por um período prolongado. Esta ação caso fosse efetiva reduziria em apenas 9% o desmatamento no ano 2025, e a paisagem apresentar-se-ia menos fragmentada, com maior conectividade entre os fragmentos de floresta remanescentes. No cenário 3, além da ação efetiva por parte dos governos, levou-se em conta a criação de novas unidades de conservação planejadas pelo governo estadual. A presença destas unidades inibiu em 10% o desmatamento até o ano 2025, e a paisagem da região apresentou maiores manchas de floresta remanescentes, protegendo inclusive as principais cabeceiras do rio Xingu.

Um segundo modelo foi desenvolvido para o município de União do Sul, diminuindo-se a resolução a 90m. Foram simulados quatro cenários até o ano 2025, nos quais assumiu-se um fato hipotético, no qual o governo estadual procurando soluções para diminuir o desmatamento decidiu impor um sistema de cotas de desmatamento por ano e por município, cotas que seriam atribuídas em função do montante já desmatado em cada município. O primeiro cenário representa a continuação das tendências atuais do desmatamento, o que levaria a uma perda de quase 50% da área de floresta do município e uma paisagem altamente fragmentada no ano 2025. Os outros três cenários simulados representaram a criação de uma nova unidade de conservação e a aplicação de cotas de

desmatamento de 20%, 50% e 80% respectivamente, dando como resultado uma maior redução na porcentagem de área desmatada e menor fragmentação da paisagem para cotas menores no ano 2025.

ABSTRACT

In the Brazilian Amazon, the state of Mato Grosso has the highest rates of deforestation; which is concentrated over “hotspots” mainly located along the BR 163 and BR 158 highways. At present, these and other regions are facing a second phase of occupation in which the profitability of logging and farming activities promotes the expansion and transformation of the frontier. This process is being reinforced by government investment programs for infrastructure projects. According to the PRODES project, the total deforestation in Mato Grosso between 2003 and 2004 was 10615 km² which represents 40% of the total deforestation activity in Amazônia in this period.

In order to facilitate the study and understanding of the complexity of deforestation and its related land cover change, spatial modeling is a potentially useful approach that represents, in a simple way, complex processes, like deforestation and simulates future scenarios.

The objective of this study is to develop a spatial model to simulate deforestation dynamics at different spatial scales in the northeast region of the state Mato Grosso up to the year 2025, as well to evaluate the response of deforestation to proximate variables through development of future scenarios. For this research the spatial simulation model DINAMICA is used with its concepts and techniques based on cellular automata and weights of evidence. For the northeastern region of the state of Mato Grosso a spatial resolution of 250m was used and three scenarios are simulated: the first scenario represented the historical tendencies (business as usual)

of deforestation, the results show that if the present tendencies persist until the year 2025 70% of the area of the northeast region of Mato Grosso will be deforested, having a highly fragmented landscape. In the second scenario represented effective actions of the federal, state and municipal governments that reduce the region's deforestation rates for a prolonged period. This action would reduce the deforestation rate by 9% up to the year 2025, and the landscape would have less fragmentation and more connectivity between forest fragments. In scenario 3, in addition to the effective action of the governments, the creation of new conservation units planned by the state government was included. The conservation of these areas would reduce the deforestation rate by 10% up to the year 2025 and the region's landscape would consist of larger forest patches, protecting the principal headwaters of the Xingu River.

A second model was developed for the municipality União do Sul, applying a spatial resolution of 90 meters. Four scenarios were simulated up to the year 2025 in three of which the state government imposes a deforestation quota per year for each municipality. The first scenario involves the continuation of present deforestation trends and indicates the loss of almost 50% of the total forested area in the municipality, having a highly fragmented landscape in the year 2025. The other three scenarios represent the creation of new conservation areas and the application of deforestation quotas of 20%, 50% and 80%; the results show an increase in the percentage of deforested area and a less fragmented landscape for the low quotas in the year 2025.

SUMÁRIO

Introdução Geral	1
Conceitualização	6
Mudanças no Uso e Cobertura da Terra.....	6
Desmatamento	7
Modelagem.....	10
Ecologia de Paisagem	12
A Importância da Escala.....	13
Fragmentação	15
Métricas de Paisagem.....	16
Modelo DINAMICA.....	18
Capítulo 1	
Modelagem do Desmatamento na Região Nordeste de Mato Grosso	20
Introdução	20
Objetivos	21
Objetivos Específicos.....	21
1. Métodos	22
1.1 Área de Estudo	22
1.2 Implementação do Modelo	26
1.2.1 Configuração Inicial	29
1.2.2 Função de Mudança.....	30
1.2.3 Calibração e Validação do Modelo.....	38
1.4 Excursão de Campo.....	40
1.5 Cenários Futuros.....	44
1.6 Caracterização da Estrutura da Paisagem.....	46
2. Resultados	47
2.1 Efeito das Variáveis Proximais sobre o Desmatamento.....	47
2.2 Validação do Modelo.....	52
2.3 Resultados do Modelo – Estrutura da Paisagem	52
3. Discussão	63
4. Conclusões	71

Capítulo 2

Modelagem do Desmatamento no Município de União do Sul – Mato Grosso ..	73
Introdução	73
Objetivos	74
1. Métodos	75
1.1 Área de Estudo	75
1.2 Implementação do Modelo	78
1.2.1 Configuração Inicial	78
1.2.2 Função de Mudança	81
1.2.3 Calibração e Validação do Modelo	81
1.3 Cenários Futuros	81
1.4 Estrutura da Paisagem	83
2. Resultados	85
2.1 Efeito das Variáveis Proximais sobre o Desmatamento	85
2.2 Validação do Modelo	88
2.3 Resultados do Modelo	90
2.4 Estrutura da Paisagem	94
3. Discussão	96
4. Conclusões	102
Bibliografia	104

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Distribuição geográfica e intensidade de áreas críticas no Estado de Mato Grosso entre 2000 e 2001 (Fonte: Alencar, et al., 2004). 4
- Figura 2.** Área de estudo e sua localização no Estado do Mato Grosso. 23
- Figura 3. A)** Total de hectares de soja plantadas na área de estudo entre 1990 e 2004. **B)** Número de cabeças de gado bovino na área de estudo entre 1990 e 2003. Fonte IBGE (2005). 25
- Figura 4.** Fluxograma da implementação e aplicação do modelo de simulação. 28
- Figura 5.** Representação gráfica de algumas das variáveis proximais usadas no desenvolvimento do modelo. A) Distância a rios. B) Distância a cidades. C) Assentamentos D) Solos. 34
- Figura 6.** Localização das Terras Indígenas (TI), Unidades de Conservação Federal (UC_Nacionais) e Unidades de Conservação Estadual propostas (UC_Propostas). 36
- Figura 7.** Efeito da distância a estradas e rios sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento. 48
- Figura 8.** Efeito da distância a cidades e distância ao desmatamento sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento. 50
- Figura 9.** Efeito de terras indígenas, unidades de conservação e assentamentos sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento. 50

Figura 10. Efeito das classes de solo sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de uma área ser desmatada. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.....	51
Figura 11a. Mapa do PRODES para o ano 2004.....	54
Figura 11b. Mapa simulado para o ano 2004	55
Figura 12. a) Evolução do desmatamento (percentagem de área desmatada) para os três cenários entre 2004 e 2025. b) Percentagem de floresta remanescente para os três cenários no ano 2025.....	56
Figura 13. Mapa do Cenário 1 no ano 2025	58
Figura 14. Mapa do Cenário 2 no ano 2025	59
Figura 15. Mapa Cenário 3 no ano 2025	60
Figura 16. Medidas da estrutura da paisagem para a classe desmatamento da região nordeste do Mato Grosso: a) Número de fragmentos de desmatamento (NP). b) Porcentagem da paisagem contida pelo maior fragmento de desmatamento (LPI). c) Agregação dos fragmentos de desmatamento (AI) na paisagem.....	61
Figura 17. Atividade madeireira, área de soja plantada e número de cabeças de gado bovino no município de União do Sul.	76
Figura 18. Município de União do Sul e sua localização no Estado do Mato Grosso.....	77
Figura 19. Representação da metodologia usada para o desenvolvimento do modelo. Ver informação teórica de cada etapa no Capítulo 1, Item 1.2.....	79

Figura 20. Efeito da distância a estradas e rios sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE) para o município de União do Sul. Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.....	85
Figura 21. Efeito da distância a cidades e distância ao desmatamento sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE) para o município de União do Sul. Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.....	86
Figura 22. Efeito das classes de solo sobre o desmatamento (latossolo = classe 3 e neossolos e gleissolos = classe 4), representado pelos pesos de evidência (WE) para o município de União do Sul. Valores positivos indicam maior probabilidade de uma área ser desmatada. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.	87
Figura 23. Mapas do PRODES 2000 e 2004 e mapa simulado para o ano 2004....	89
Figura 24. Mapa do Cenário 1 (tendências atuais) no ano 2025.	90
Figura 25. Mapas no ano 2025 dos Cenários 2 (cota de 80%) e 3 (cota de 50%)...	91
Figura 26. Mapa no ano 2025 Cenário 4 (cota de 20%).	92
Figura 27. a) Percentagem de área desmatada do município de União do Sul nos quatro cenários para o período 2004 - 2025. b) Percentagem de floresta remanescente para os 4 cenários no ano 2025.....	93
Figura 28. Medidas da estrutura da paisagem do município de União do Sul para os diferentes cenários: a) Número de fragmentos (NP). b) Porcentagem da paisagem ocupada pelo maior fragmento (LPI) de desmatamento. c) Agregação (AI) dos fragmentos de desmatamento.	95
Figura 29. Medidas da estrutura da paisagem do município de União do Sul para os diferentes cenários. Media ponderada da área do índice de distribuição da forma (SHAPE_AM).	96

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Taxa média de crescimento do desflorestamento (km²/ano) nos Estados da Amazônia Legal entre os anos de 1997 e 2004 (Fonte: PRODES, 2005) 3
- Tabela 2.** Simplificação dos solos em 7 classes e suas correspondentes classificações segundo o RADAMBRASIL e o Sistema Brasileiro de Classificação. Fonte: EMBRAPA (1999). 35
- Tabela 3.** Lista de índices selecionados para avaliar o efeito dos cenários simulados na estrutura da paisagem da região nordeste de Mato Grosso. Para maiores detalhes consultar (McGarigal *et al.*, 2002). 46
- Tabela 4.** Lista de índices de paisagem utilizados para avaliar a estrutura da paisagem do município de União do Sul para cada um dos cenários no período de 2005 a 2025. Para maiores detalhes, consultar (McGarigal *et al.*, 2002). 84

Introdução Geral

A perda de florestas tropicais é uma preocupação mundial pelos diferentes impactos que causa no meio ambiente tanto em nível regional como global. Na atualidade, grande parte deste desmatamento está confinado em umas tantas regiões que experimentam uma mudança rápida e altas taxas de desmatamento (Lambin *et al.*, 2003).

O desmatamento é um processo complexo que acontece pela interação de diferentes fatores ambientais e socioeconômicos, os quais podem mudar dependendo da escala tanto temporal como espacial e variar de um local a outro. Para facilitar o estudo e a compreensão desta problemática, a modelagem é uma ferramenta útil que permite representar, de maneira mais simples, processos complexos como o desmatamento e simular possíveis trajetórias futuras dependendo de cenários.

Nas últimas décadas, com os avanços nas técnicas de mapeamento e sensoriamento remoto, a modelagem tem evoluído muito. Não obstante, nossa capacidade de modelar estes processos é maior que a capacidade para produzir os dados necessários para representar o processo com exatidão. Para isso, torna-se necessário identificar as variáveis que têm maior influência, numa tentativa de resolver pelo menos parte da complexidade em relação às múltiplas forças que direcionam o desmatamento. Neste sentido, foram desenvolvidos vários tipos de modelos para representar o desmatamento que têm mostrado bons resultados tanto

para representar o processo como para modelar cenários futuros, baseados na influência de determinantes espaciais.

Junto à modelagem, a ecologia da paisagem tem contribuído com a análise e a compreensão de alguns dos efeitos do desmatamento na estrutura e função da paisagem. Essencial para esta aproximação em nível da paisagem, tem sido a compreensão de como as atividades humanas, a exemplo do desmatamento, têm transformado a paisagem, e como estas atividades o afetarão no futuro. Para isto, diferentes índices de paisagem foram desenvolvidos permitindo quantificar os efeitos das atividades humanas na estrutura da paisagem.

Processo de Ocupação Humana na Região Nordeste de Mato Grosso

Os formatos de ocupação encontrados na Amazônia são o resultado de sucessivos processos de desenvolvimento implementados pelo governo brasileiro nas últimas décadas e baseados na idéia da Amazônia como uma fronteira de expansão econômica.

A fase recente de ocupação da Amazônia começou nos anos 60 com a construção de estradas ligando a região centro-sul com a norte. Nas décadas de 70 e 80, implantaram-se grandes projetos de colonização e mineração, e graças aos incentivos fiscais, foram iniciados grandes projetos agropecuários.

Na atualidade, a Amazônia encontra-se em uma segunda fase de ocupação na qual a rentabilidade de atividades extrativistas e agropecuárias está impulsionando a expansão e transformação da fronteira, e este processo está sendo reforçado por programas governamentais de investimento em obras de infraestrutura (Margulis, 2003; Alencar *et al.*, 2004; Carneiro Filho, 2005). As obras

governamentais, soma-se a construção de milhares de quilômetros de estradas endógenas (não-oficiais), construídas de maneira ilegal em terras públicas por atores locais (principalmente madeireiros) (Souza *et al.*, 2005).

Estas atividades históricas e a atual situação causaram grandes impactos ambientais e socioeconômicos, sendo os Estados do Mato Grosso e Pará uns dos mais afetados.

Nos estados de Mato Grosso, Pará e Rondônia da Amazônia Legal brasileira encontra-se a maior frente de desmatamento conhecida como "arco do desmatamento". Dentro desta região o Estado do Mato Grosso apresenta as maiores taxas de desmatamento (Tabela 1).

Tabela 1. Taxa média de crescimento do desflorestamento (km²/ano) nos Estados da Amazônia Legal entre os anos de 1997 e 2004 (Fonte: PRODES, 2005)

Estado	96/97	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03	03/04
Acre	358	536	441	547	419	727	903	771
Amapá	18	30	-	-	7	-	5,19	18
Amazonas	589	670	720	612	634	1016	1582	1207
Maranhão	409	1012	1230	1065	958	1330	933	755
Mato Grosso	5271	6466	6963	6369	7703	7578	10410	11814
Para	4139	5829	5111	6671	5237	8697	6772	8494
Rondônia	1986	2041	2358	2465	2673	3605	3610	3833
Roraima	184	223	220	253	345	54	439	311
Tocantins	273	576	216	244	189	259	156	158
Amazônia Legal	13227	17383	17259	18226	18165	23266	24871	27362

Dentro do Estado do Mato Grosso, existem áreas onde a perda de cobertura florestal tem acontecido de maneira intensa e concentrada, e estas são consideradas como áreas críticas. Estas áreas se concentram principalmente na

região nordeste do Estado ao longo das vias Cuiabá-Satarém (BR 163) e na BR-158, localizada a leste do Parque Indígena do Xingu (Alencar *et al.*, 2004) (Figura 1).

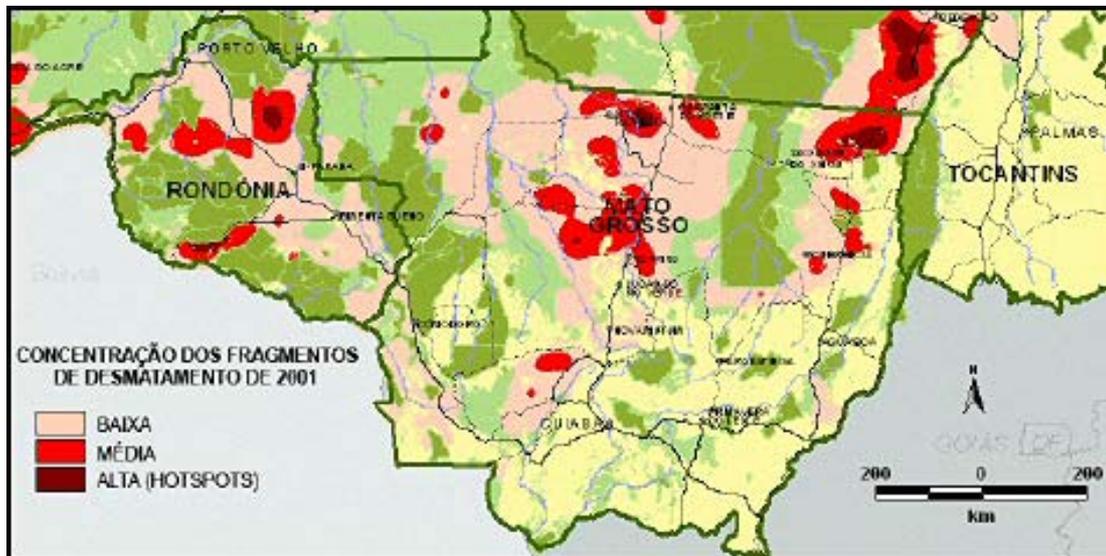


Figura 1. Distribuição geográfica e intensidade de áreas críticas no Estado de Mato Grosso entre 2000 e 2001 (Fonte: Alencar, et al., 2004).

Na parte nordeste do Estado de Mato Grosso se encontra o Parque Indígena do Xingu, no qual vivem várias etnias indígenas, e que se constitui em uma importante reserva de biodiversidade. O parque é atravessado pelo rio Xingu um importante recurso hídrico para a região, mas suas cabeceiras estão fora dos limites do parque.

Na década de 80, iniciaram-se as primeiras invasões de pescadores e caçadores no território do parque. Ao final dos anos 90, com o incremento das atividades agropecuárias, as áreas utilizadas para tais propósitos chegaram até os limites do parque. Na atualidade, o crescimento do cultivo da soja, incentivado pelos altos preços do grão no mercado internacional, está ameaçando o parque e os

remanescentes florestais da região (Alencar *et al.*, 2004; Carneiro Filho, 2005). Por causa dos desmatamentos e das queimadas, além das atividades associadas à preparação de novas terras para o cultivo de soja e pastagens, várias nascentes do Rio Xingu já secaram. Sem a vegetação, as chuvas têm provocado o assoreamento em vários cursos de água. Em consequência, cresce a perspectiva de uma grave crise hídrica na região, que atingirá não só os moradores do parque como também os fazendeiros, os agricultores e a sociedade em geral (ISA, 2004).

Para tentar entender o processo de desmatamento e seu efeito na estrutura e função da paisagem na região, é necessário ter conhecimento de quais são as principais determinantes espaciais e como elas estão influenciando o desmatamento. Além disto é necessário quantificar algumas mudanças na estrutura da paisagem. Isto pode ser realizado através da modelagem e o cálculo de alguns índices de paisagem com a finalidade não só de compreender os processos, mas também, de simular possíveis trajetórias futuras sob diferentes cenários. Estes resultados também podem servir de suporte nas estratégias de conservação e planos de manejo ambiental visando encontrar possíveis soluções à problemática do desmatamento nesta região.

Conceitualização

Para uma melhor compreensão das idéias desenvolvidas nesta dissertação serão conceitualizados a seguir alguns temas e conceitos relacionados com: Mudanças no uso e cobertura da terra, modelagem e ecologia de paisagem.

Mudanças no Uso e Cobertura da Terra

Conceitos Básicos

É importante aclarar a terminologia e definições usadas nos estudos de mudanças no uso e cobertura da terra.

Cobertura da terra é definida pelos atributos da superfície e a sub-superfície da terra incluindo biota, solo, topografia, água superficial e subterrânea e estruturas humanas. **Uso da terra** refere-se à maneira e o propósito pelos quais o homem explora a cobertura da terra.

Na análise da cobertura e uso da terra é importante conceituar o termo mudança; a **mudança na cobertura da terra** é a substituição parcial ou completa de um tipo de cobertura por um outro, enquanto a **mudança no uso da terra** também inclui a modificação dos tipos de cobertura, bem como a intensificação em seu uso sem mudar totalmente sua classificação (Turner *et al.*, 1995; Verburg, 2000; Lambin *et al.*, 2003).

Diferentes processos naturais também podem mudar a cobertura da terra. No entanto, as mudanças globais na cobertura da terra, no presente como no passado recente, são na sua maioria o resultado de atividades humanas.

Estas atividades estão transformando cumulativamente a cobertura da terra em um ritmo acelerado e em uma escala global, afetando diretamente a diversidade biológica e os ciclos biogeoquímicos, ocasionando mudanças climáticas, degradação do solo e alterando os serviços ecológicos. Com isto fica comprometida a capacidade dos sistemas biológicos em suprir as necessidades humanas (Turner *et al.*, 1995; Vitousek *et al.*, 1997; Sala *et al.*, 2000; Lambin *et al.*, 2001; Fearnside, 2003).

Pela gravidade e magnitude destes impactos, compreender melhor a dinâmica da mudança do uso e cobertura da terra tem sido reconhecida como uma prioridade na investigação das mudanças ambientais globais.

Um dos maiores focos de investigação é explicar os padrões e mudanças nas taxas de transformação ambiental em termos de forças direcionadoras que atuam em escala global, regional e em nível de tomadores de decisões. Neste contexto, entender as causas do desmatamento tropical tem sido identificado como uma das questões chave na investigação das mudanças ambientais globais (Geist & Lambin, 2001).

Desmatamento

Na atualidade, as mudanças mais importantes no uso da terra em escala global são os desmatamentos tropicais. Tais fatos foram tratados por muito tempo de forma simplificada (Geist & Lambin, 2001). Estudos recentes têm dissipado estas

simplificações e introduzido uma representação destes processos muito mais complexa e intrincada (Angelsen & Kaimowitz, 1999; Geist & Lambin, 2001; Geist & Lambin, 2002).

O desmatamento nas regiões tropicais resulta da interação de várias causas que variam em importância e número dependendo tanto da escala temporal como da espacial. Estas podem ser agrupadas em 3 classes segundo Geist e Lambin (2002):

- **Variáveis proximais** - são atividades humanas que afetam diretamente o ambiente. Elas podem ser interpretadas como os mais imediatos e diretos fatores que se originam do uso da terra e diretamente impactam a cobertura florestal e se agrupam em três amplas categorias: expansão agrícola, extração de madeira e expansão da infra-estrutura.
- **Variáveis direcionadoras** - são forças fundamentais que são subjacentes ou motivadoras das causas proximais. Nelas encontram-se fatores demográficos, econômicos, tecnológicos, fatores políticos e institucionais e um complexo de fatores sociopolíticos e culturais.
- **Outras causas** - agrupam os fatores associados ao desmatamento, compostos pela predisposição de fatores ambientais, diretrizes biofísicas e eventos sociais desencadeadores.

Nas regiões tropicais, o desmatamento está em grande parte confinado a umas poucas áreas que experimentam uma mudança rápida, com altas taxas de desmatamento anuais (Lambin et al., 2003).

Dados do satélite LANDSAT, interpretados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE,2005), indicam que a área total desflorestada na Amazônia Legal até 2003 foi de 633.004 km² o que representa 14% da área total. A taxa de desflorestamento anual média para o período de 1997 a 2003 foi de 19.083 km² ano⁻¹, chegando a 29.059 km² ano⁻¹ em 1995, sendo que os estados do Mato Grosso e Pará apresentam as maiores taxas de desmatamento (Tabela 1). Das áreas desmatadas até 1999, 80% estava sob pastagens ou sob floresta secundária em pastagens degradadas e abandonadas, tendo a pecuária e posteriormente a soja como formas predominantes de uso da terra (Fearnside, 1999).

Com a acelerada perda de floresta, tem-se registrado graves conseqüências sobre o meio ambiente, sendo as principais: perda de biodiversidade (Roper & Roberts, 1999; Fearnside, 2003), mudanças climáticas provocadas pelo aumento de gases do efeito estufa (Fearnside, 2003; Desjardins *et al.*, 2004) e impactos hidrológicos como: inundações, alteração no transporte de sedimentos, matéria orgânica e nutrientes associados, que comprometem a integridade dos ecossistemas e conseqüentemente a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequada para o consumo humano (Andreassian, 2004; Bruijnzeel, 2004). Alguns destes impactos hidrológicos são evidentes na região do arco de desmatamento como demonstram alguns estudos (Williams & Melack, 1997; Ballester *et al.*, 2003; Costa *et al.*, 2003).

Para entender as causas e conseqüências dos diferentes processos que originam o desmatamento, os modelos de uso da terra são ferramentas em

crescente desenvolvimento nas últimas décadas, permitindo uma melhor compreensão da complexidade destes processos.

Modelagem

A modelagem de processos ambientais e mudanças no uso da terra tem crescido significativamente desde os anos 60, com o desenvolvimento de técnicas de mapeamento assistido por computador, sistemas de informações geográficas e uma ampla disponibilidade de dados de sensoriamento remoto.

Um modelo é uma abstração de um sistema real, é uma simplificação na qual somente aqueles componentes que são significativos para o problema e disponíveis são representados no modelo. O melhor modelo é aquele que atinge o maior realismo com menor número de parâmetros e menor grau de complexidade (Wainwright & Mulligan, 2004).

As mudanças no uso da terra são processos relativamente complexos de modelar, porque neles interagem muitas variáveis e fatores. Neste sentido, não usar maior complexidade que a necessária em um modelo, ou representação da realidade, é um importante princípio na modelagem, visto que nossa habilidade de modelar complexidade é muito maior que nossa capacidade de fornecer os dados necessários para parametrizar, calibrar e validar um modelo (Wainwright & Mulligan, 2004).

Segundo Pedrosa e Câmara (2002), um modelo consta de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamento e processos. Dependendo do objetivo, pode-se dar ênfase a um ou outro destes elementos. Dentro desta visão, os modelos podem ser classificados em:

- *Modelos empíricos* que abordam os relacionamentos entre as variáveis do modelo, a partir da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro. Os modelos mais comuns dentro desta classe são as cadeias de Markov, modelos logísticos de difusão e regressão.
- *Modelos de sistemas* que enfatizam as interações entre todos os componentes de um sistema representadas através de descrições matemáticas.
- *Modelos de simulação espacial* que descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo, e são usados como ferramentas para facilitar o entendimento do funcionamento e dinâmica dos processos e sua interação com diferentes variáveis.

Estes modelos requerem como entrada dados cartográficos e mapas multitemporais do uso da terra armazenados em um sistema de informações geográficas. Nesse ambiente, diferentes técnicas de análise estatística podem ser usadas para quantificar os efeitos espaciais das variáveis que afetam as mudanças do uso da terra (Soares-Filho *et al.*, 2006). É necessário diferenciar dois tipos de variáveis:

As **causas proximais** que explicam a de características regionais na configuração espacial dos padrões de mudanças. Da análise do efeito destas variáveis, se obtêm mapas de probabilidade de mudanças do uso da terra (Geist &

Lambin, 2001). Estas causas podem ser representadas por meio de modelos espaciais.

As **causas subjacentes** explicam os fatores subjacentes às mudanças do uso da terra e são exógenas ao modelo espacial. Estas podem ser modeladas com outro tipo de modelo e ser integradas ao modelo de simulação espacial (Geist & Lambin, 2001).

Modelos ajudam a prever como os sistemas ambientais podem evoluir diante de um conjunto de circunstâncias e cenários, traduzidos por diferentes conjuntos de fatores socioeconômicos, políticos e ambientais. Com a análise do resultado do modelo, podem-se testar hipóteses sobre possíveis trajetórias do sistema e suas implicações ambientais (Soares-Filho *et al.*, 2006).

Ecologia de Paisagem

O meio ambiente é um sistema complexo que possui aspectos biofísicos e ecológicos inter-relacionados em diferentes escalas espaciais e temporais. Para melhorar a compreensão destas relações e para ajudar a resolver problemas ambientais, surgiu a ecologia de paisagem, enfatizando a importância do contexto espacial nos processos ecológicos e a do homem na paisagem, introduzindo nas inter-relações fatores socioeconômicos, políticos, históricos e culturais inerentes a suas atividades.

Diferente de outros ramos da ecologia, na ecologia de paisagem os fatores antropogênicos são explicitamente baseados no reconhecimento do homem em influenciar a estrutura e função da paisagem. Assim, a ecologia de paisagem não se centra unicamente nas características biológicas e físicas de um ambiente, mas também, nos diferentes fatores acima mencionados, dando como resultado, mudanças na paisagem. O homem faz parte deste sistema e não é apenas um fator externo de perturbação (Soares-Filho, 1998).

A formação e a evolução de uma paisagem é o resultado de três mecanismos operando em três escalas temporais diferentes: processos geomorfológicos/geológicos ocorrendo durante longo tempo, padrões de colonização de organismos se desenvolvendo numa escala média de tempo e rápidas perturbações em ecossistemas locais (Forman & Godron, 1986). A percepção e compreensão destes mecanismos dependem da escala espacial na qual é definida, dependendo do interesse particular do estudo a se realizar.

A Importância da Escala

A escala, tanto espacial como temporal, é um conceito muito importante que é subjacente a vários fenômenos que podem explicar mudanças nos padrões da paisagem. O aumento ou diminuição da escala pode levar a drásticas variações nos parâmetros e processos de interesse, e muitas vezes se perde informação ao considerar os dados em uma escala mais grosseira (Turner *et al.*, 1989).

Mudanças de curta duração afetam áreas pequenas e mudanças com uma maior duração afetam áreas maiores. Este princípio generalizado é conhecido como

princípio espaço-tempo (Forman, 1995). Este princípio também implica que os fenômenos em escalas amplas são mais persistentes ou estáveis que aqueles nas escalas mais finas. Os fenômenos em escalas menores apresentam maior variação tanto no espaço como no tempo.

Para tentar compreender como a paisagem se mantém em um patamar estável dentro deste princípio, a teoria da hierarquia e da cibernética combinadas são as principais aproximações.

A teoria da hierarquia se refere a um sistema de elementos funcionais discretos e ligados a duas ou mais escalas. Cada um dos níveis dentro da hierarquia funciona como uma unidade, e possui suas próprias restrições e graus de variação. As paisagens são sistemas abertos, em que o fluxo de energia, organismos vivos e materiais articulam tanto os elementos dentro de um nível como entre níveis.

A cibernética refere-se aos sistemas nos quais cada um dos elementos está ligado por laços de retroalimentação. Existe uma retroalimentação positiva na qual um elemento afeta um segundo elemento o qual a sua vez afeta o primeiro. Este é um ciclo que não traz estabilidade. Pelo contrário, a retroalimentação negativa é um mecanismo regulador que sustenta a estabilidade, combinando uma ligação positiva e uma outra negativa (Forman, 1995).

O conceito de escala espacial inclui tanto grão como a extensão. Extensão é a área completa abarcada pela investigação. O grão refere se ao tamanho das unidades individuais de observação. A extensão e o grão definem os limites máximo e mínimo de resolução de um estudo. Na estimativa de um padrão da paisagem não

podem ser detectados padrões além da extensão da paisagem ou inferiores resolução do grão (McGarigal *et al.*, 2002).

É importante que a extensão e o grão sejam definidos em um estudo e que representem, na medida do possível, o fenômeno a ser estudado; de outra forma, o padrão detectado na paisagem terá pouco significado e pode levar a conclusões erradas. Na prática, a extensão e o grão são determinados pela escala das imagens usadas e as capacidades técnicas computacionais disponíveis (McGarigal *et al.*, 2002).

Fragmentação

Dentro dos diferentes processos que transformam a paisagem, a fragmentação de habitat se converteu em um assunto de especial interesse na comunidade científica internacional, devido às proporções que este processo alcançou nos últimos anos e os graves impactos ambientais gerados em nível mundial.

A fragmentação pode ser causada tanto por perturbações naturais, como atividades humanas. E esta pode ser o resultado de um único evento, ou um processo bem seja seqüencial ou contínuo, onde os fragmentos são progressivamente divididos em fragmentos menores.

Segundo Forman (1995), a variação de diferentes atributos espaciais dos fragmentos é um dos principais efeitos da fragmentação. Entre os mais comumente reportados se encontram: densidade de fragmentos, distância entre fragmentos,

comprimento da borda dos fragmentos, corredores, tamanho do fragmento e área interior do fragmento.

As variações destes atributos junto à mudança nos padrões espaciais causados pela fragmentação afetam as espécies de diferentes organismos de diferentes maneiras. Entre os efeitos que ocasionam aumentos, encontram-se: isolamento, número de espécies generalistas, número de espécies de borda, número de espécies exóticas, predação de ninhos e taxa de extinção. Em contraste, diminuições são características para: dispersão de especialistas de interior, espécies com áreas de vida grandes e riqueza de espécies de interior.

A fragmentação afeta quase todos os padrões e processos ecológicos, desde genes até funções no ecossistema. Alguns processos se incrementam, diminuem ou não mudam, como por exemplo perturbações naturais, fluxos hidrológicos, movimento do vento, ciclo de nutrientes, produtividade e fluxo genético (Saunders *et al.*, 1991; Forman, 1995; Collinge, 1996; Jaeger, 2000; Laurance *et al.*, 2000).

Métricas de Paisagem

As métricas de paisagem são medidas quantitativas dos padrões espaciais de uma paisagem. Têm sido amplamente usadas na ecologia da paisagem para conhecer como varia a estrutura de uma paisagem como consequência de perturbações naturais e atividades humanas ao longo do tempo.

Dentro das atividades antropogênicas que mais afetam a estrutura e a evolução da paisagem, encontram-se as mudanças no uso e cobertura da terra. Estas mudanças são o resultado da interação de diferentes fatores e variáveis que

conformam uma característica espacial observável em uma escala da paisagem (Forman, 1995; Lambin *et al.*, 2003).

As métricas de paisagem concentram-se nas características espaciais e distribuição dos fragmentos em uma paisagem e, segundo McGarigal (2002) são definidas em três níveis:

Métricas em nível de fragmento - são definidas por fragmentos individuais, e representam as características e contexto espacial dos fragmentos individuais. O valor calculado para cada fragmento individual tem pouco valor interpretativo, pelo qual este tipo de métricas serve principalmente como base computacional para o cálculo de várias outras métricas de paisagem.

Métricas em nível de classe - são a integração de todos os fragmentos de um dado tipo (classe). Esta integração pode ser obtida pela simples média dos fragmentos individuais, ou através de um método que toma em conta além da média, o tamanho do fragmento. Estas métricas quantificam separadamente a quantidade e configuração espacial de cada classe de fragmentos, permitindo desta forma quantificar o tamanho e fragmentação de cada classe na paisagem.

Métricas em nível da paisagem - são a integração de todos os tipos ou classes de fragmentos na paisagem inteira. Representam o padrão espacial da paisagem e, de uma maneira mais ampla, podem ser interpretadas como um índice de heterogeneidade. Estas métricas são usadas em muitas aplicações onde o interesse principal é o padrão (composição e configuração) da paisagem em relação a processos ecológicos.

As métricas são divididas em duas categorias gerais:

Composição - são métricas que quantificam características associadas à variedade e abundância de tipos de fragmentos dentro de uma paisagem, sem considerar as características espaciais e localização dos fragmentos dentro da paisagem.

Configuração espacial - são métricas que se referem ao arranjo, posição ou orientação dos fragmentos dentro de uma classe ou paisagem.

Um grande número de métricas têm sido desenvolvidas nos últimos anos. Geralmente, um pequeno grupo destas métricas cuidadosamente selecionadas é suficiente para dar uma boa aproximação de alguns padrões e estrutura da paisagem (Forman, 1995; Riitters *et al.*, 1995; Li *et al.*, 2005).

Modelo DINAMICA

Neste estudo foi usado o programa DINAMICA. Este programa é um modelo de simulação espacial que foi desenvolvido e aplicado para a fronteira de colonização no Estado de Mato Grosso na Amazônia brasileira, e tem sido aplicado com êxito em diferentes estudos de simulação e mudanças do uso da terra na Amazônia (Soares-Filho *et al.*, 2002; Soares-Filho *et al.*, 2004; Soares-Filho *et al.*, 2005; Soares-Filho *et al.*, 2006; Ferreira de Castro *et al.*, submetido).

O programa DINAMICA tem uma interface gráfica de fácil operação e foi desenvolvido para facilitar a introdução das informações, cálculos estatísticos e

execução do modelo. O programa é disponibilizado pela UFMG via Internet (<http://www.csr.ufmg.br/>).

DINAMICA é baseado em modelos de autômatos celulares. Neste tipo de modelos, o espaço é representado por um mosaico de células de tamanhos e formas iguais (raster). O estado de cada uma destas células depende de seu estado prévio e da aplicação de regras de transição, qualitativas ou quantitativas, que determinam quando e por que o estado de uma célula se altera de acordo com o estado de células vizinhas. Todas as células são atualizadas simultaneamente em intervalos discretos de tempo.

O modelo usa como entrada um conjunto de mapas em formato raster: um mapa inicial de uso da terra, um mapa de tempo de permanência de cada célula em seu estado atual e mapas de variáveis estáticas e dinâmicas, calculando as últimas para cada interação do modelo. Estas variáveis são combinadas através da definição de seus pesos de evidência para gerar mapas de probabilidades de transição. Sobre estes mapas de transição são aplicadas funções de alocação baseadas na técnica de autômatos celulares.

Capítulo 1

Modelagem do Desmatamento na Região Nordeste de Mato Grosso

Introdução

No Estado de Mato Grosso, o desmatamento se encontra localizado principalmente na região norte, em pontos críticos ao longo das principais rodovias BR 163, BR 158 e MT 80 (Alencar *et al.*, 2004). Existe um grande número de causas e fatores que se relacionam entre si e variam em intensidade e número, dando como resultado a difícil situação pela que atravessa o Estado. Na atualidade, é necessário adquirir um maior conhecimento da problemática do desmatamento que permita planejar ações dirigidas, as quais tenham maiores possibilidades de serem efetivadas. A modelagem é uma ferramenta que tem sido usada com êxito como uma maneira de abordar esta problemática.

Os modelos tentam simplificar problemas complexos, facilitando sua compreensão e permitindo simular situações futuras, usando para isto diferentes abordagens científicas. Dentro da abordagem dos modelos algumas das variáveis que intervêm no desmatamento, são identificadas como sendo as que apresentam maior influência. Estas são usadas para simular o desmatamento através de diferentes técnicas estatísticas. Os modelos também permitem modificar estas variáveis a fim de criar situações hipotéticas que permitam testar possíveis trajetórias futuras sob diferentes condições. Junto aos modelos, as métricas de paisagem são ferramentas úteis que permitem avaliar os efeitos das situações

simuladas sobre a estrutura da paisagem dos resultados dos modelos e obter uma melhor compreensão do processo.

Objetivos

O objetivo geral deste foi implementar um modelo espacial para simular o desmatamento na região nordeste do Estado de Mato Grosso até o ano 2025, além de avaliar as respostas do desmatamento a variáveis proximais através de três cenários futuros.

Objetivos Específicos

Utilizando a metodologia e conceitos do modelo DINAMICA, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Descrição, identificação e análise das principais variáveis proximais relacionadas com o desmatamento na região;
- Calibração e validação do modelo;
- Simulação de três cenários futuros: cenário 1 - baseado nas tendências históricas de desmatamento na região; cenário 2 - baseado nas ações do governo federal entre 2004 e 2005 para controlar o desmatamento na região, e cenário 3 - baseado no controle do desmatamento por parte do governo federal e a implantação de novas unidades de conservação.

1. Métodos

1.1 Área de Estudo

O modelo foi realizado em uma área de 700 km x 400 km situada na região nordeste do Estado de Mato Grosso (Figura 2). A paisagem geral corresponde a uma área de transição ecológica, apresentando diferentes formações vegetais, desde cerrado, cerradões e florestas semidecíduais mais secas até floresta ombrófila aberta e ombrófila densa. Os solos na região são, principalmente, argissolos e latossolos. A área apresenta uma altitude média de 400 m, as partes mais altas são áreas correspondentes a cerrado na parte norte e leste, com altitudes máximas de 640 m e altitude mínima de 160 m na região de floresta. A região apresenta uma precipitação de 2000 a 3000 mm anuais, com uma estação seca de três meses (maio-julho) e temperatura média anual em torno de 24 °C.

Dentro desta região, encontram-se alguns dos principais formadores do rio Xingu, que compõem uma bacia drenada pelos rios Von den Stein, Jatobá, Ronuro, Batovi, Kurisevo e Kuluene; sendo este último o principal formador do Xingu ao se encontrar com o Batovi-Ronuro, que conformam um valioso recurso hídrico para a região.

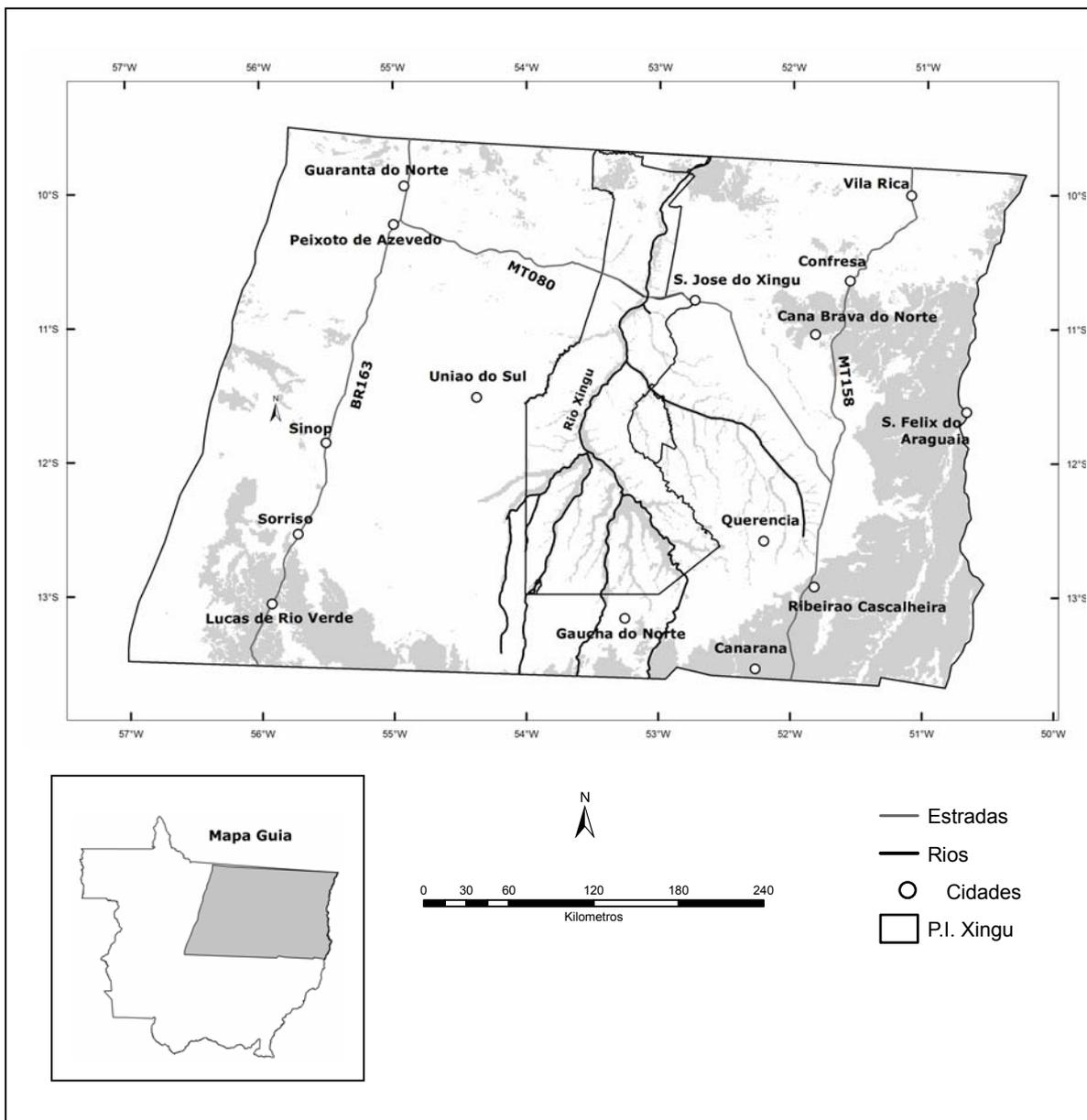


Figura 2. Área de estudo e sua localização no Estado do Mato Grosso.

A área possui 37 municípios. Dentro da área encontram-se 11 terras indígenas, perfazendo uma área de 4.401.590 ha, sendo o Parque Indígena Xingu o maior, com 2.642.003 hectares. O parque foi criado em 1961 e demarcado em 1978. Nos anos 90, foram adicionadas as terras indígenas Wawi e Batovi, ficando a área

total do parque com 2.797.491 hectares. O Parque tem o duplo propósito de proteger o ambiente e as populações indígenas (Figura 2).

A região possui cinco Unidades de Conservação Federal com uma área total de 225.965 hectares; não existe nenhuma Unidade de Conservação Estadual (Figura 8).

A colonização da área começou nos anos 60, com diferentes planos do governo que objetivavam a ocupação da Amazônia através da construção de rodovias, criação de assentamentos rurais ao longo das mesmas e grandes empreendimentos agrícolas e pecuaristas através de incentivos fiscais (Siqueira, 2002). Esta expansão agropecuária e a ocupação desta área com programas de assentamentos foi e tem sido realizada prioritariamente no eixo das estradas BR 163, BR 158 e MT 80.

Ao longo da história de ocupação da região até a época presente, as principais atividades econômicas têm sido a exploração madeireira, a agropecuária e a mineração. Na atualidade, estas atividades reforçadas por projetos governamentais de investimento em obras de infra-estrutura estão impulsionando a expansão e a transformação da fronteira (Margulis, 2003; Alencar *et al.*, 2004; Carneiro Filho, 2005). Estas atividades foram realizadas de maneira desordenada e com escasso controle por parte do estado, fatores que levaram às altas taxas de desmatamento e à difícil situação ambiental que se apresentam na atualidade.

O cultivo da soja é a atividade agrícola com maior crescimento nos últimos dez anos (Figura 3A), justificam-se devido ao aumento na demanda no preço do grão nos mercados internacionais e a desvalorização do real frente ao dólar.

No caso da pecuária a facilidade e baixo custo de implantação somado ao uso da mesma como mecanismo de posse e especulação com a terra têm motivado seu constante crescimento na região (Figura 3B).

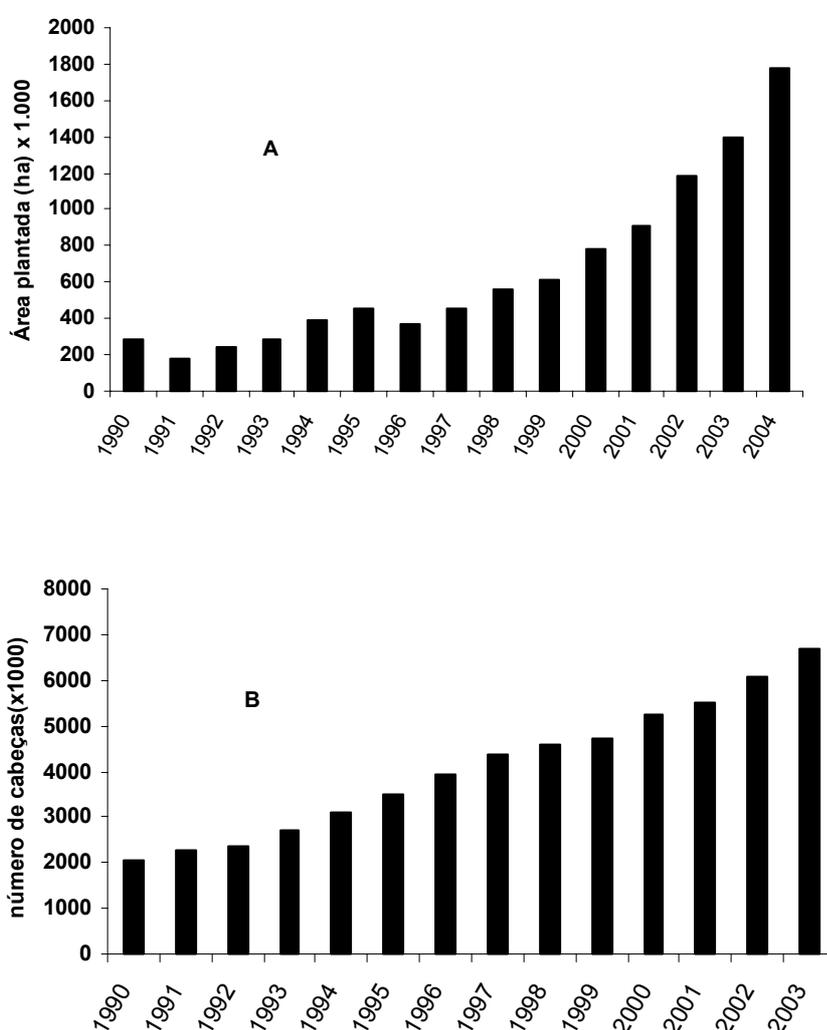


Figura 3. A) Total de hectares de soja plantadas na área de estudo entre 1990 e 2004. **B)** Número de cabeças de gado bovino na área de estudo entre 1990 e 2003. Fonte IBGE (2005).

Na atualidade, um aumento na demanda de carne tanto no mercado nacional como internacional também está influenciando a expansão da agropecuária (Arima *et al.*, 2005).

A exploração madeireira também continua sendo uma atividade importante principalmente na região centro-oeste da área de estudo em áreas de da BR 163 (Lentini *et al.*, 2005).

Os dados de desmatamento do projeto PRODES para a área de estudo mostram que até 2004, 40% da área foram desmatados. Esta porcentagem sobe para 49% se não se considera a área do Parque Xingu. Os principais focos de desmatamento se encontram ao longo das rodovias BR 163, BR 158 e MT 80. A parte localizada à leste do Parque Xingu apresenta uma maior devastação, sendo mais fragmentada e com muito pouca floresta contínua. A parte oeste apresenta maior desmatamento na área de influência da BR 163, ainda que apresente um marcado deterioro da floresta, com menor fragmentação e áreas um pouco mais preservadas, principalmente, nas zonas próximas ao Parque Xingu. Na região de estudo, ainda existem aproximadamente 12 milhões de hectares de floresta remanescente, o que representa 59% da área (incluindo o Parque Xingu).

1.2 Implementação do Modelo

O modelo neste estudo foi implementado usando a metodologia e conceitos do programa computacional DINAMICA. Foram usados mapas de diferentes fontes

para implementar o modelo. Todos os mapas foram convertidos em representação raster e armazenados junto com as imagens da área de estudo em uma base de dados.

A definição da resolução da célula unitária das representações raster dependeu de um ajuste entre a possibilidade de representação da frequência espacial dos dados de interesse e por outro lado, a capacidade de desempenho e armazenamento computacional (Soares-Filho, 1998).

Os mapas de entrada foram transformados em formato *raster* com uma resolução espacial de 250 m, usando os programas ArcGis 9.0 e ER Mapper 6.4. Esta resolução deu como resultado uma matriz de 2946 x 1854 células para toda a área de estudo.

O programa também requer como entrada uma matriz de transição dos diferentes usos da terra e pesos de evidência, que representam a influência das variáveis selecionadas nas mudanças. Na seqüência, serão explicadas as diferentes operações realizadas pelo programa para o desenvolvimento e execução do modelo (Figura 4).

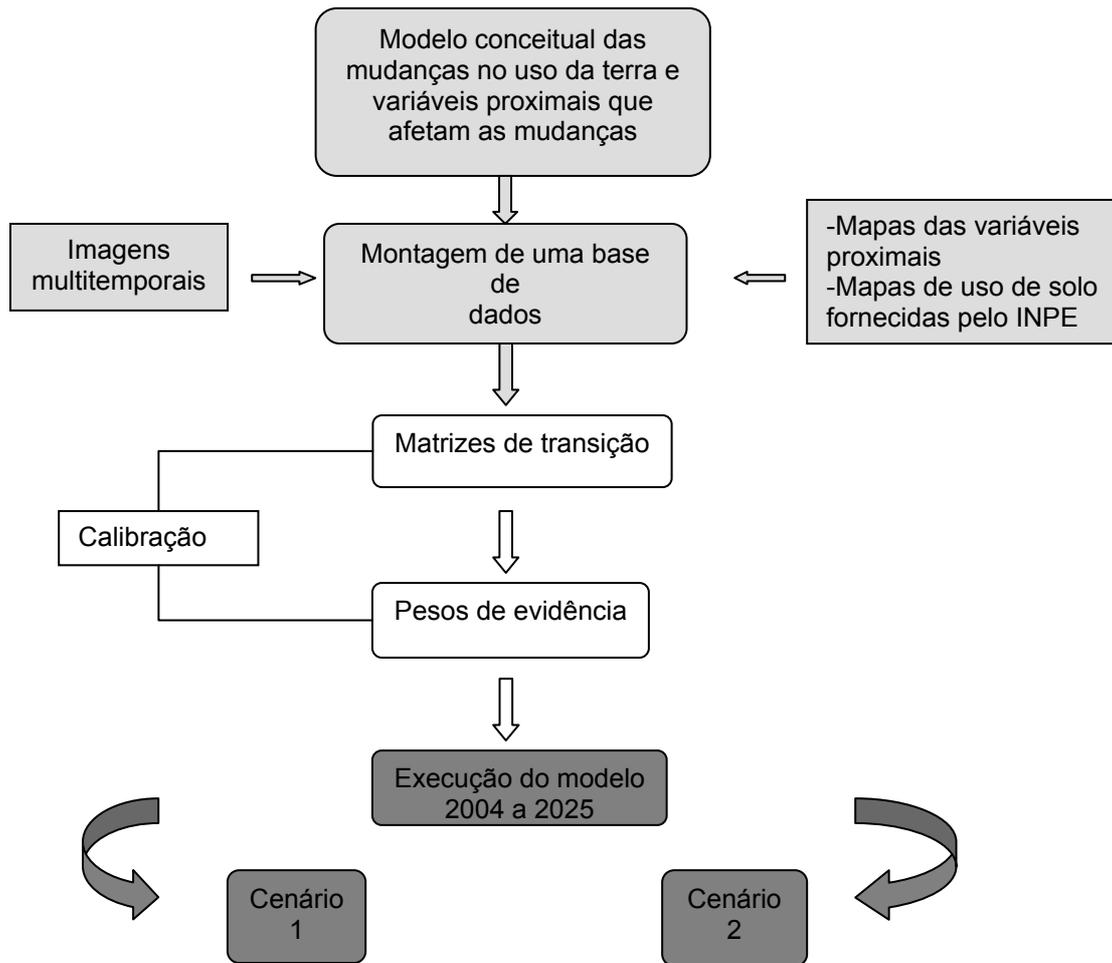


Figura 4. Fluxograma da implementação e aplicação do modelo de simulação.

■ Configuração inicial □ Função de mudança ■ Configuração de saída.

Os componentes básicos do modelo de simulação espacial são: configuração inicial, função de mudança e configuração de saída.

1.2.1 Configuração Inicial

Consiste de mapas dos usos da terra da área de estudo. Os diferentes usos da terra e padrões de mudança que apresenta a região foram simplificados em três usos da terra: floresta, desmatamento e não floresta, e uma transição que é floresta a desflorestamento. Esta simplificação é justificada pelo fato destes serem os únicos tipos de uso da terra com dados recentes disponíveis para a área de estudo fornecidos pelo projeto PRODES (INPE, 2005).

O projeto PRODES monitora anualmente o desmatamento na Amazônia Legal brasileira através de imagens Landsat TM e disponibiliza os dados via internet. O PRODES realiza uma interpretação e classificação das imagens considerando três classes: floresta, desflorestamento (envolve a completa remoção da cobertura florestal) e não floresta (áreas identificadas nas imagens como constituída de vegetação distinta daquela de fisionomia florestal) que na região de Mato Grosso corresponde principalmente a cerrado. A única transição contemplada é de floresta a desmatamento. Ela é acumulativa ao longo do tempo e não considera a regeneração. A área mínima que é considerada como desmatamento é 6,5 ha.

Mapas de Uso de Solo

Os mapas de uso de solo, foram obtidos a partir de os mapas de desmatamento do Estado do Mato Grosso para os anos 2000 e 2004, disponibilizados pelo projeto PRODES (INPE, 2005). Estes são fornecidos em formato *raster* a uma resolução espacial de 60 m.

Em alguns casos, os mapas apresentavam outras classes como nuvens e água. Em tais casos, estas classes foram consideradas como “sem dados”.

1.2.2 Função de Mudança

Esta consta de duas funções, uma para quantificar as mudanças e uma outra de alocação espacial das mudanças.

Uma maneira simples de representar o modelo de estado e transições da área de estudo é o uso de matrizes de transição (Eq.1), as quais representam a distribuição de quantidades de mudanças por toda a paisagem.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & P_{\cdot 1} & P_{j1} \\ P_{12} & P_{22} & P_{\cdot 2} & P_{j2} \\ P_{1\cdot} & P_{2\cdot} & P_{\cdot\cdot} & P_{j\cdot} \\ P_{1j} & P_{2j} & P_{\cdot j} & P_{jj} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=0} \quad 1)$$

Na matriz P_{ij} as colunas representam as probabilidades de um estado i permanecer no mesmo estado ou mudar para o estado j durante o intervalo de tempo de t a $t + v$, de modo que:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Sendo o estimador de P_{ij} dado pela Equação 2, onde n é o número de estados.

$$\hat{P}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^n n_{ij}} \quad 2)$$

No modelo de transição, como definido anteriormente, os estados foram: floresta, não floresta e desflorestamento, e com uma única transição: de floresta a desflorestamento.

Para o cálculo da taxa de transição, foi usada uma ferramenta do programa DINAMICA, a qual usa como entrada os mapas de classificação disponibilizados pelo INPE em formato raster. Estes são analisados através de tabulação cruzada, permitindo detectar e quantificar as mudanças.

A taxa de transição do estado de floresta a desmatado foi calculada para o período entre o ano 2000 e 2004 em passos anuais. O programa usa como entrada os mapas de uso de solo: um mapa inicial (2000) e um mapa final (2004). Como resultado foi obtida uma matriz de transição que é a representação das mudanças de um estado para outro em toda a área de estudo e um mapa de mudanças para o período analisado.

Na seqüência, se selecionaram algumas variáveis proximais e se calcularam os efeitos destas nas mudanças usando a técnica de pesos de evidência.

Variáveis Proximais

A influência de variáveis proximais no desmatamento tem sido analisada por vários estudos (Chomitz & Gray, 1996; Deininger & Minten, 1996; Mamingi *et al.*,

1996; Nelson & Hellerstein, 1997; Soares-Filho, 1998; Pfaff, 1999; Mertens & Lambin, 2000; Geist & Lambin, 2002; Mertens *et al.*, 2002; Mertens *et al.*, 2004). Na atualidade, com a popularização dos métodos de sensoriamento remoto e SIG, muitas destas variáveis podem ser facilmente representadas em mapas. Além desta característica, uma só destas variáveis pode representar vários processos, motivo pelo qual são amplamente usadas em modelos como fatores determinantes do desmatamento. Oito variáveis foram escolhidas com base em uma revisão bibliográfica e em observações de campo:

Todas as variáveis foram geradas a partir de mapas de todo o Estado de Mato Grosso, disponibilizados por diferentes fontes. Para todas as operações necessárias para gerar os mapas finais, descritas neste item, foram usadas ferramentas de análise dos programas ArcGis 9.0, ER Mapper 6.4 e DINAMICA 2.4.

- **Distância a estradas:** Para representar a malha viária foi utilizado um mapa de estradas do Estado de Mato Grosso, disponibilizado para este estudo pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR).

Foi calculada a distância euclidiana em intervalos regulares de 250 m, a partir de cada uma das estradas até os limites finais do mapa.

- **Distância a rios:** Foi utilizado o mapa hidroviário disponibilizado pelo IBGE. Este mapa é disponibilizado em formato vetorial (shapefile), e representa os principais rios navegáveis.

Para cada um dos rios foi calculada a distância euclidiana em intervalos regulares de 250 m até o final do mapa (Figura 5A).

- **Distância a Cidades:** Para representar esta variável foi usado o mapa de cidades de Mato Grosso, disponibilizado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA). Foi calculada a distância euclidiana ao redor de cada centro urbano, em intervalos regulares de 250 m até o limite final do mapa (Figura 5B).

- **Distância de floresta ao desmatamento:** Esta variável foi gerada pelo programa DINAMICA. Quando o modelo foi executado, o programa, tomando como base o mapa de uso da terra do ano 2000, calcula a distância da floresta ao desmatamento, em intervalos regulares de 250 m, gerando um mapa de distância. Como esta variável varia em função do tempo, o modelo a calcula para cada ano modelado.

- **Assentamentos:** Foi usado o mapa de localização dos diferentes assentamentos fornecido pelo INCRA e atualizado até o ano 2002 (Figura 5C).

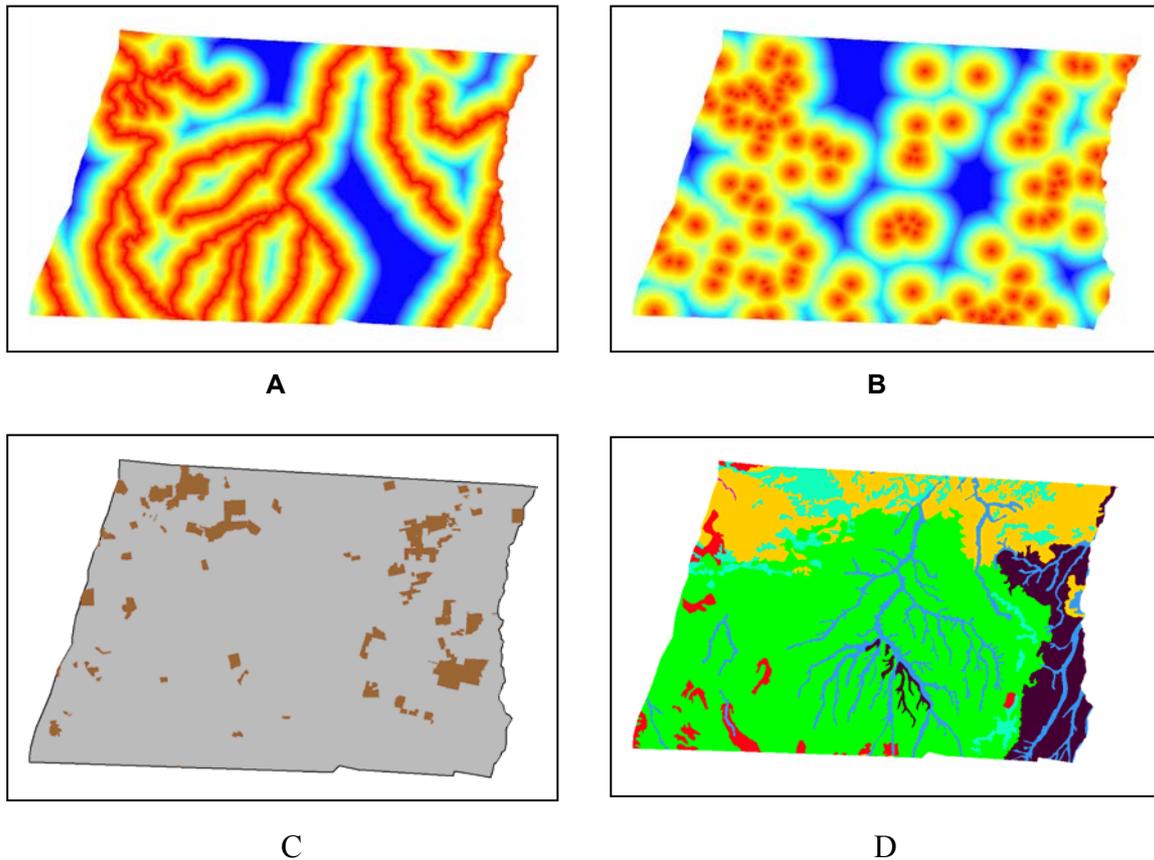


Figura 5. Representação gráfica de algumas das variáveis proximais usadas no desenvolvimento do modelo. A) Distância a rios. B) Distância a cidades. C) Assentamentos D) Solos.

- **Terras Indígenas e Unidades de Conservação:** As diferentes terras indígenas e unidades de conservação existentes na área foram representadas usando-se os mapas fornecidos pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA) e o IBAMA respectivamente, atualizados até o ano 2005 (Figura 6).

- **Declividade:** O mapa de declividade foi gerado a partir dos dados do modelo digital de elevação de terreno fornecidos pela "National Imaging and Mapping Agency (NIMA)" derivado dos dados do SRTM/X-SAR.

- **Solos:** Foi usado o mapa de solos do RADAMBRASIL (1:1.000.000). Os tipos de solos representados para a área de estudo foram simplificados e reagrupados em 7 classes (Tabela 2). As classes 4 e 5 não foram consideradas, porque elas estão localizadas em áreas de cerrado e veredas de rios, que não estão incluídas nos dados de desmatamento do PRODES.

Tabela 2. Simplificação dos solos em 7 classes e suas correspondentes classificações segundo o RADAMBRASIL e o Sistema Brasileiro de Classificação. Fonte: EMBRAPA (1999).

Classe	Classificação RADAM	Sistema Brasileiro de classificação (1999)
Classe 1	Massa de água	-
Classe 2	Areias quartzosas- Areias quartzosas litolíticas	Neossolos
Classe 3	Latossolo vermelho-Amarelo, latossolo vermelho, latossolo vermelho-escuro, latossolo, latossolo roxo e cambissolo	Latossolos
Classe 4	Solos aluviais*, gleissolo, planossolo	*Neossolos, gleissolo, planossolos
Classe 5	Plintossolo, Plintossolo solidico	Plintossolos
Classe 6	Podzólico vermelho-amarelo, terra roxa estruturada, terra roxa estruturada latossolica, brunizem avermelhado*	Argissolos, *chernossolos
Classe 7	Solos litólicos*, afloramento de roxas, solos petroplinticos, **vertissolos	*Neossolos, ** vertissolos

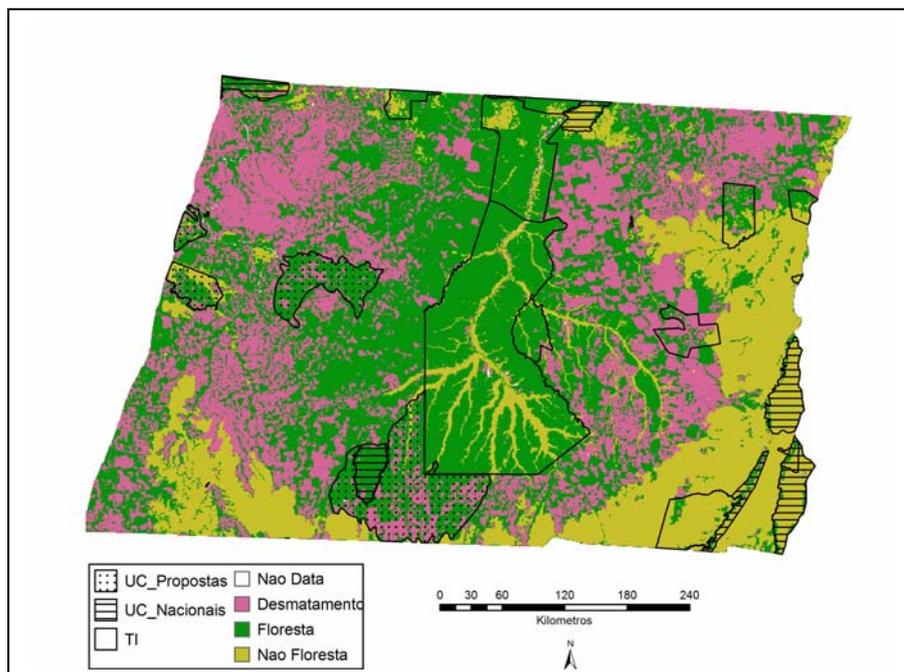


Figura 6. Localização das Terras Indígenas (TI), Unidades de Conservação Federal (UC_Nacionais) e Unidades de Conservação Estadual propostas (UC_Propostas).

O cálculo dos efeitos das variáveis proximais nas mudanças foi realizado com a técnica de pesos de evidência. Este método não é restringido pelas suposições clássicas dos métodos estatísticos paramétricos, os quais dados espaciais freqüentemente violam (Soares-Filho *et al.*, 2006).

O efeito de cada variável pode ser calculado independente de uma solução combinada, sendo que a única premissa seria de que as variáveis espaciais de entrada sejam espacialmente independentes.

O peso de evidência representa a das variáveis proximais nas probabilidades espaciais de uma transição $i \rightarrow j$, e foi calculado pelas equações 3 e 4.

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/\bar{D}\}} \quad 3)$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^+ \quad 4)$$

Onde $O\{D\}$ é a chance de ocorrer a priori o evento D e $O\{D/B\}$ é a chance de ocorrer D dado um padrão espacial B . W^+ é o peso de evidência de ocorrer o evento D dado um padrão espacial B .

A probabilidade que a transição $i \rightarrow j$ ocorra a posteriori é expressa pela Equação 5. Neste caso $O\{D\} = 1$, porque já é passada ao modelo via matriz de transição.

$$P(i \rightarrow j(x,y)/V) = \frac{e^{\sum Wkn_{i \rightarrow j(V)^{xy}}}}{1 + \sum_{ij} e^{\sum Wkn_{i \rightarrow j(V)^{xy}}}} \quad 5)$$

V representa um vetor de k variáveis espaciais, medidas nas localidades x,y e representadas por seus pesos W^+_{k1xy} , W^+_{k2xy} , ..., W^+_{knny} , sendo n o número de categorias de cada variável k .

O cálculo dos pesos de evidência foi realizado através do programa DINAMICA, conforme a metodologia descrita anteriormente.

O programa DINAMICA possui um módulo para o cálculo dos pesos de evidência, o qual usa como entrada os mapas de uso da terra inicial e final, além de uma camada contendo os mapas das variáveis proximais selecionadas. O programa calcula, no caso das variáveis de distância, a influência que a variável tem sobre o

processo de desmatamento na medida em que a distância aumenta. Para as variáveis categóricas, calcula o peso de evidência para cada categoria da variável.

Foram calculados os pesos de evidência para o período compreendido entre o ano 2000 e 2004. Como resultados obtiveram-se os pesos de evidência para cada uma das variáveis.

O segundo componente da função de mudança opera sobre o mapa de probabilidades de mudança, buscando alocar as quantidades desejadas de mudança através do ordenamento e sorteio das células mais prováveis. A alocação das mudanças é realizada pelo uso de técnicas de autômatos celulares.

Como regras locais para alocar as mudanças, DINAMICA usa um engenho composto por dois processos de transição complementares denominados *expander* e *patcher*. O primeiro se dedica à expansão ou contração das manchas prévias de uma determinada classe, e o segundo é responsável por formar novas manchas. Os dois processos usam um mecanismo nucleador de manchas, que opera sobre o mapa de probabilidades de transição. A quantidade definida de células a serem mudadas para uma determinada transição pode ser repartida entre as duas funções através de um parâmetro que pode ser especificado no programa DINAMICA.

1.2.3 Calibração e Validação do Modelo

Os mapas de uso da terra simulados obtidos precisam ter um ajuste acima de 50% (Soares-Filho, com per) quando comparados com os dados do PRODES, para serem validados.

Para comparar os mapas foi utilizado o método "fuzzy modificado" (Hagen, 2003). No contexto desta metodologia, o termo "fuzzy" significa o nível de incerteza e indeterminação que apresenta um mapa. Este é um método de comparação de mapas categóricos em formato raster que considera duas fontes de inexatidão: problemas na diferenciação de categorias e deslocamento na localização das células. A representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor grau, pelas células na vizinhança. Como resultado da aplicação deste método, é obtido um índice de similitude entre 1 (mapas idênticos) e 0 (total divergência).

O programa DINAMICA possui um módulo para calcular o índice de similitude dos mapas comparados que usa o método fuzzy modificado e permite usar janelas de comparação de diferentes tamanhos.

Para a execução do modelo, o programa DINAMICA possui uma interface gráfica que facilita a introdução dos dados necessários.

Para calibrar o modelo foi executada uma simulação para quatro anos, sendo o ano inicial 2000. Como entrada, DINAMICA recebe: i) o mapa de uso de solo ii) um mapa de tempo de permanência de cada célula em seu estado inicial, sendo que neste mapa, todas as células tiveram o mesmo tempo de permanência no estado inicial, iii) a camada dos mapas das variáveis proximais, iv) a matriz de transição, em que a taxa de transição calculada foi mantida constante para cada ano, v) os pesos de evidência. Como resultado, foi obtido um mapa simulado para o ano 2004.

O programa permite variar os pesos de evidência e a percentagem das funções de alocação. Estas funções são baseadas na técnica de autômatos celulares. A função "patcher" cria novas manchas, e a função "expander" expande as

já existentes. O modelo foi executado várias vezes variando-se os parâmetros destas funções até se obter o melhor ajuste possível.

Para validar o modelo foram comparados o mapa simulado e o mapa original fornecido pelo PRODES para o ano 2004, usando uma janela de 5 x 5.

1.4 Excursão de Campo

Para o desenvolvimento e execução do modelo, o programa DINAMICA utiliza principalmente dados obtidos de imagens de satélite e bases cartográficas, que na atualidade são obtidos e gerados sem maiores dificuldades com ajuda de diferentes programas computacionais.

Não obstante, era preciso ter um conhecimento empírico da problemática da região nordeste do Estado de Mato Grosso com relação ao desmatamento, a fim de determinar algumas das variáveis e fatores que tinham maior e qual era o papel destas no processo de desmatamento. Este conhecimento foi essencial na hora de desenvolver e calibrar o modelo e a elaboração de cenários futuros.

Foi realizada uma excursão de campo, de dois meses e meio de duração. O trabalho de campo teve como principal finalidade percorrer algumas cidades e povoados e obter informações em diferentes instituições e ONGs e junto a diferentes atores envolvidos na problemática do desmatamento.

A excursão constou de três etapas a saber:

1. Uma etapa institucional onde, se visitou as cidades de Brasília e Cuiabá para obter informações acerca da área de estudo além das ações previstas pelos diferentes órgãos.

2. Uma etapa denominada etapa de campo dividida em duas fases: na primeira, em companhia do meu orientador, percorremos durante 15 dias algumas regiões de influência da BR 163. Na segunda fase se percorreram-se algumas regiões de das rodovias MT 80 e BR 158 durante 15 dias.
3. Terceira etapa com um mês e meio de duração, realizada no Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em Belo Horizonte. Análise de dados e modelagem preliminar.

Segue uma descrição de cada uma destas etapas:

- **Etapa Institucional:**

1. A excursão começou na cidade de Brasília. Durante oito dias, foram visitadas algumas instituições para obter informação adicional sobre a região de estudo, que permitiram incrementar o conhecimento da situação tanto histórica como atual do processo de desmatamento, além de identificar as regiões e/ou municípios que têm maior influência no processo de desmatamento e políticas públicas tanto vigentes como planejadas para o futuro. As instituições visitadas foram:

- **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA):** Nesta instituição, foram entrevistados os diretores ou encarregados nesse momento das seguintes chefias e coordenações:

- Diretoria de Fiscalização

- Coordenação Geral de Unidades de Conservação

- Diretoria de Florestas
- Coordenação Geral de Florestas Nacionais
- Diretoria de Ecossistemas
- Centro de Sensoriamento Remoto (CSR)

- **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA-SOLOS.):** Foi visitada a dependência da EMBRAPA – Cerrados, e foram entrevistados alguns pesquisadores encarregados de projetos envolvendo soja, pecuária e a área sócio econômica. Também foi visitado o laboratório de sensoriamento remoto e SIG.

- **Instituto Socioambiental (ISA):** é uma ONG que vem trabalhando nos últimos anos na região do Xingu em temas relacionados com mudança no uso da terra abordando áreas socioeconômicas e ambientais. Foi entrevistado um representante do instituto com ampla experiência de trabalho na região nordeste do Estado de Mato Grosso.

2. Na cidade de Cuiabá visitou-se a **Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEMA)**, a qual foi fechada em data recente, e suas funções assumidas pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). Foi entrevistado o encarregado do setor de geoprocessamento.

- **Etapa de campo**

- Na primeira fase, visitaram-se algumas cidades encontradas na área de da rodovia BR 163. Foram visitadas as seguintes cidades: Lucas de Rio Verde, Sinop, Claudia, Alta Floresta e Guarantã do Norte.

- Na segunda fase foram visitadas algumas cidades na área de das rodovias BR 158 e MT 80: São José do Xingu, Vila Rica, Confresa, São Felix do Araguaia e Querência.

Nas duas áreas foram entrevistados alguns atores das diferentes atividades agropecuárias e socioeconômicas. Foram visitadas fazendas, cooperativas de produção e comercialização, prefeituras, escritórios regionais do IBAMA, ONG's, assentamentos e organizações eclesiais.

- **Terceira etapa:**

Foi realizado um estágio de um mês e meio no Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em Belo Horizonte, com a finalidade de realizar um treinamento sobre os conceitos e uso do modelo DINAMICA e processar parte dos dados sob a orientação da equipe que desenvolveu o modelo.

1.5 Cenários Futuros

Uma vez calibrado e validado o modelo, foram simuladas tendências futuras do desmatamento, prevendo potenciais intervenções nas políticas públicas por parte dos governos federal e estadual por um período compreendido entre 2004 e 2025. Para tanto, foram trabalhados três cenários:

Um cenário pessimista, denominado **Cenário 1**, procura reproduzir a continuação das tendências históricas do desmatamento na região até 2025. Neste cenário, foi assumido que a aplicação de fatores que podem mudar as tendências do desmatamento, tais como: aplicação de leis ambientais, investimentos, tendências agrícolas, organização social e melhoramento de serviços públicos e infra-estrutura seguiram os padrões históricos até 2025.

O segundo cenário, denominado **Cenário 2**, foi baseado em algumas das ações empreendidas por parte do governo nacional entre os anos 2004 e 2005 dentro do Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal, as quais consistiram principalmente de: i) Implantação de postos de controle permanentes no Estado do Mato Grosso. Estes postos são bases permanentes, de onde serão coordenadas e apoiadas ações de fiscalização. Segundo a Diretoria de Fiscalização do IBAMA, estão projetados cinco destes postos no Estado do Mato Grosso, pretendendo com isto, reduzir consideravelmente as taxas de desmatamento a partir de 2005. ii) Ações de fiscalização e operações como a Operação “Curupira”, que desarticulou uma ampla rede de corrupção envolvendo diferentes funcionários do IBAMA e o governo estadual do Mato Grosso.

O cenário assume que estas ações continuarão e melhorarão, reduzindo-se as taxas de desmatamento atual em 50%. Esta taxa foi usada para simular o desmatamento até 2025.

Para representar esta condição, a taxa de transição que foi calculada para o período entre 2000 e 2004 foi reduzida em 50%, e o modelo foi executado até o ano 2025.

O terceiro cenário, denominado **Cenário 3**, além de tomar em conta as ações por parte do governo federal, assume a criação de novas Unidades de Conservação por parte do governo estadual, além de um reforço nas ações empreendidas pelo IBAMA. O governo estadual tem planejado implementar novas Unidades de Conservação. Destas unidades, aproximadamente 1.596.784 ha estão na área de estudo (Figura 6).

Para representar este cenário, além de reduzir a taxa de transição em 50%, foi usado o mapa das Unidades de Conservação projetadas para o Estado do Mato Grosso, fornecido pela Fundação Estadual de Meio Ambiente do Mato Grosso (SEMA). O mapa foi convertido em formato *raster* com uma resolução de 250 m e utilizado como uma camada adicional no conjunto de variáveis proximais. Foram calculados novamente os pesos de evidência.

O programa DINAMICA permite variar os pesos de evidência para cada uma das variáveis com o objetivo de criar novos cenários. Os pesos de evidência para Unidades de Conservação existentes e projetadas e para Terras Indígenas foram

colocados no valor mais baixo possível (valores negativos), o que significa menor probabilidade de desmatamento dentro destas unidades.

O modelo foi executado usando-se a matriz de transição e pesos de evidência modificados até o ano 2025.

1.6 Caracterização da Estrutura da Paisagem

Para avaliar o efeito de cada um dos cenários simulados sobre a estrutura da paisagem foram usados três índices de paisagem os quais foram escolhidos com base na revisão de alguns estudos de mudança na estrutura da paisagem (Forman, 1995; Riitters *et al.*, 1995; Gustafson, 1998; Imbernon & Branthomme, 2001; de Barros Ferraz *et al.*, 2005; Matsushita *et al.*, 2005). Uma breve descrição dos índices selecionados encontra-se na Tabela 3. Os índices foram aplicados a classe desmatamento, e foram calculados usando o programa FRAGSTAT 3.3 (McGarigal *et al.*, 2002).

Tabela 3. Lista de índices selecionados para avaliar o efeito dos cenários simulados na estrutura da paisagem da região nordeste de Mato Grosso. Para maiores detalhes consultar (McGarigal *et al.*, 2002).

Índice	Descrição	Descrição
NP	Number of Pathches	Contabiliza o número de fragmentos de desmatamento
LPI(%)	Large Pathch Index	Quantifica o total de área da paisagem contida pelo fragmento de desmatamento de maior tamanho. Os valores vão de 0 (nenhum fragmento) até 100 (um fragmento ocupa toda a área)
AI	Aggregation Index	Quantifica o nível de agregação dos fragmentos de cada classe. Os valores estão contidos em um intervalo de 0 (máxima desagregação) até 100

2. Resultados

A taxa de transição de floresta a desmatamento calculada para o período compreendido entre o ano 2000 e 2004 foi de 0,039, e foi usada como taxa de desmatamento fixa para todos os anos.

2.1 Efeito das Variáveis Proximais sobre o Desmatamento

Distância a Estradas

A proximidade a estradas aumenta a probabilidade de desmatamento como era esperado, segundo vários estudos (Chomitz & Gray, 1996; Alves, 2002; Mertens *et al.*, 2004) e de acordo com o observado durante a excursão de campo. As regiões entre 0 e 5 km de distância de uma estrada apresentaram uma maior probabilidade de serem desmatadas. A partir de 5 km, na medida que a distância aumentou, esta probabilidade foi diminuindo. Esta tendência continuou diminuindo até os 50 km (Figura 7a). O efeito real de cada uma das estradas é difícil de quantificar, no entanto, as estradas principais e em melhores condições terão uma influência mais forte e até a distâncias maiores. A máxima distância até a qual foi encontrada influência das estradas sobre o desmatamento (50 km) corresponde ao encontrado por alguns pesquisadores para a região no caso de estradas principais como, a BR 163 (Fearnside, 2005).

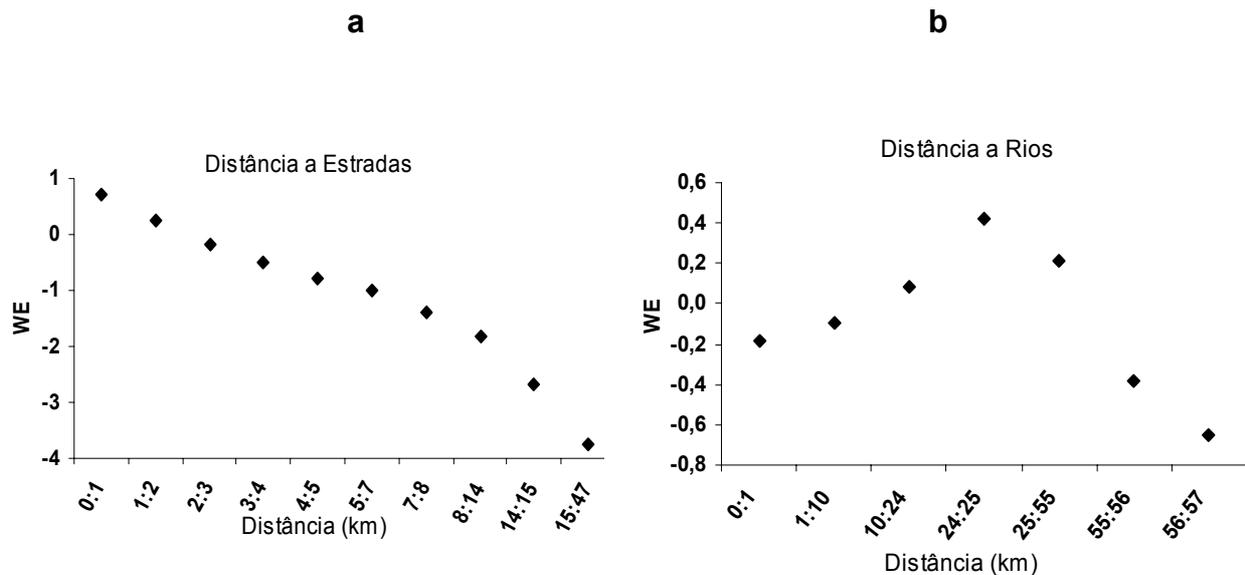


Figura 7. Efeito da distância a estradas e rios sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.

Distância aos Rios

A distância aos rios apresentou uma tendência inversa àquela observada para as estradas. A probabilidade de uma área ser desmatada foi menor perto dos rios e, foi aumentando na medida em que a distância aumentou. A probabilidade de desmatamento foi menor em áreas até 10 km de distância dos rios. A partir de 10 km em diante a probabilidade aumentou (Figura 7b). Depois dos 25 km, a tendência começa a diminuir novamente.

Distância a Cidades

As áreas até 22 km de distância das cidades apresentaram maior probabilidade de desmatamento. Uma diminuição no desmatamento ocorreu em faixas de distâncias entre 22 km e 44 km. E esta diminuição foi ainda maior nas

áreas entre 44 km e 55 km (Figura 8a). Estas características foram evidentes durante a visita à área de estudo. As áreas ao redor das cidades apresentam muita atividade agropecuária, e em algumas cidades a instalação de silos para soja, frigoríficos para comercialização de carne e madeireiras podem estar aumentando a influência e a distância até a qual estas favorecem o desmatamento. Contudo, é muito difícil quantificar qual é o peso que cada uma das principais atividades de uma cidade exercem sobre o desmatamento.

Distância a Florestas

As áreas de floresta próximas a zonas desmatadas apresentaram a típica “inércia espacial” dos processos de mudanças de uso da terra (Mertens & Lambin, 2000), na qual as áreas de floresta remanescentes perto do desmatamento tiveram maior probabilidade de serem desmatadas. Na medida em que esta distância aumentou, distâncias maiores a 1500 m, a probabilidade diminuiu (Figura 8b).

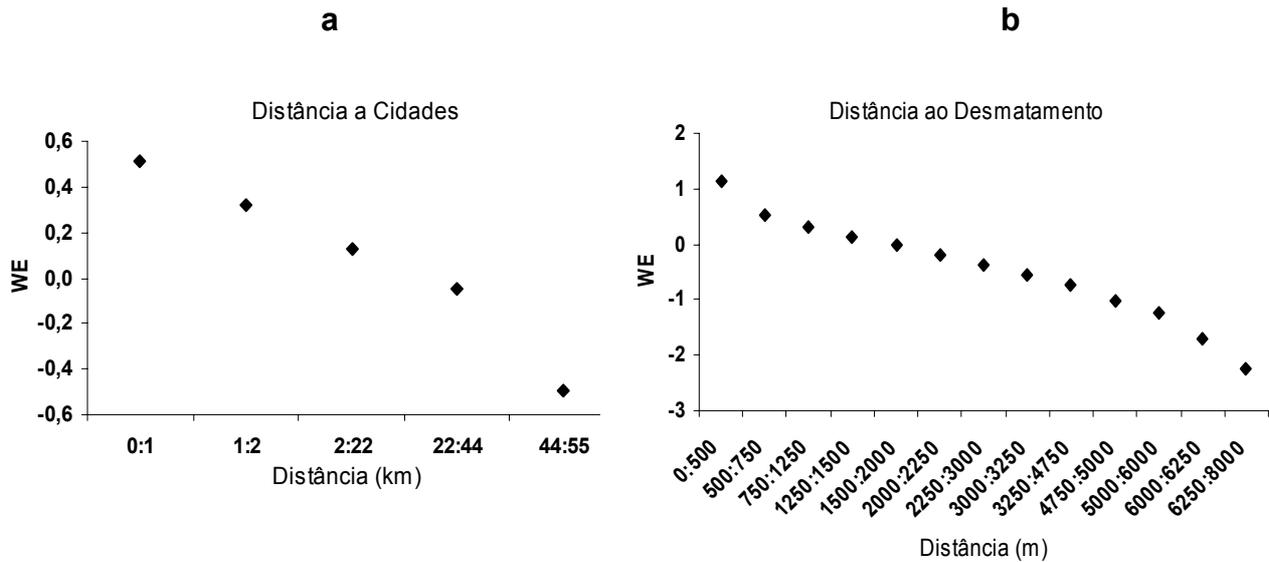


Figura 8. Efeito da distância a cidades e distância ao desmatamento sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.

Tanto as Terras Indígenas como as Unidades de Conservação apresentaram baixas probabilidades de serem desmatadas, enquanto as áreas de assentamentos apresentam uma maior probabilidade de serem desmatadas (Figura 9).

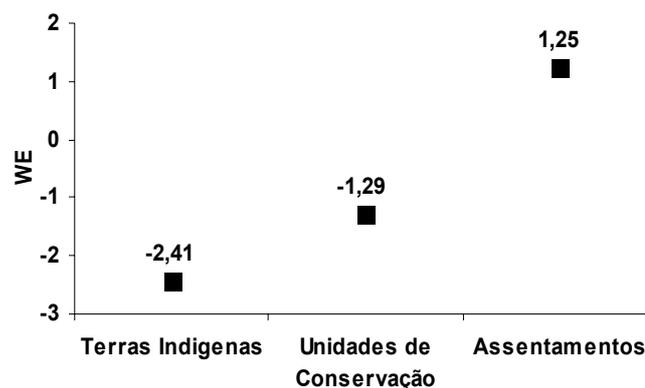


Figura 9. Efeito de terras indígenas, unidades de conservação e assentamentos sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.

Na área de estudo, todas as declividades influenciaram positivamente o desmatamento e apresentaram a mesma probabilidade de serem desmatadas (WE = 0,25).

Os neossolos (classe 2) e os latossolos (classe 3) não influenciaram no desmatamento. Áreas com gleissolos, planossolos (classe 4) e plintossolos (classe 5) não foram consideradas por estarem localizadas nas áreas de cerrado. O desmatamento teve maior probabilidade de ocorrer nas áreas com solos argissolos - Chernossolos (classe 6) e Neossolos – Vertissolos e afloramentos de rochas (classe 7) (Fig 10).

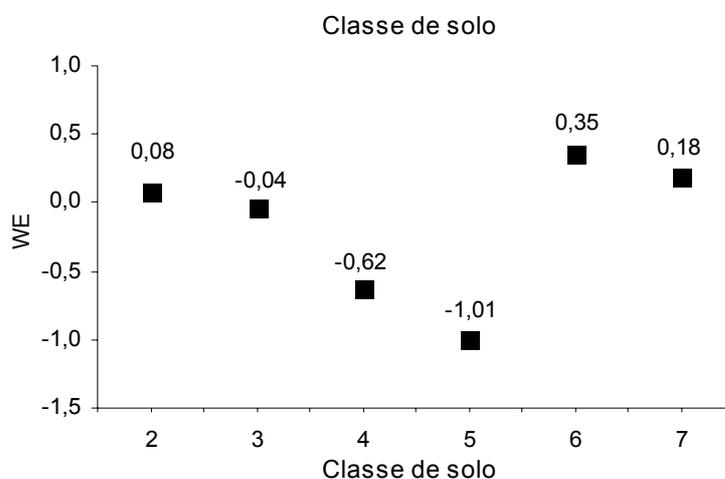


Figura 10. Efeito das classes de solo sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE). Valores positivos indicam maior probabilidade de uma área ser desmatada. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.

2.2 Validação do Modelo

Um índice de similaridade de 0,51 foi obtido ao comparar o mapa simulado 2004 e o mapa original fornecido pelo PRODES para o ano 2004. Usando uma janela de comparação entre células vizinhas de 5X5. A distribuição espacial do desmatamento entre os dois mapas é similar como se pode observar na figura 11. Este valor pode ser considerado aceitável porque o método usado para comparar os mapas somente compara as células que variaram. Assim, valores acima de 50% de similaridade podem ser considerados aceitáveis, desde que a distribuição espacial do desmatamento nos mapas comparados sejam similares (Soares-Filho, Comunicação Pessoal).

2.3 Resultados do Modelo – Estrutura da Paisagem

Uma vez calibrado o modelo, foram simulados 21 mapas de desmatamento para cada um dos cenários. Na Figura 12, está representada a tendência do desmatamento (percentagem de área desmatada) para o período entre 2004 e 2025 referente aos três cenários. A percentagem para o ano 2004 corresponde ao dado disponibilizado pelo PRODES. Neste ano, 40% da área de estudo estava desmatada.

No Cenário 1, pode-se observar que a percentagem de área desmatada é maior que nos outros cenários. Para o ano 2008, a metade da área de estudo já estará desmatada, e 74% da área será desmatada até 2025. Continuando essa

tendência, 100% da área de floresta desaparecerá aproximadamente no ano 2039, à exceção do Parque Xingu.

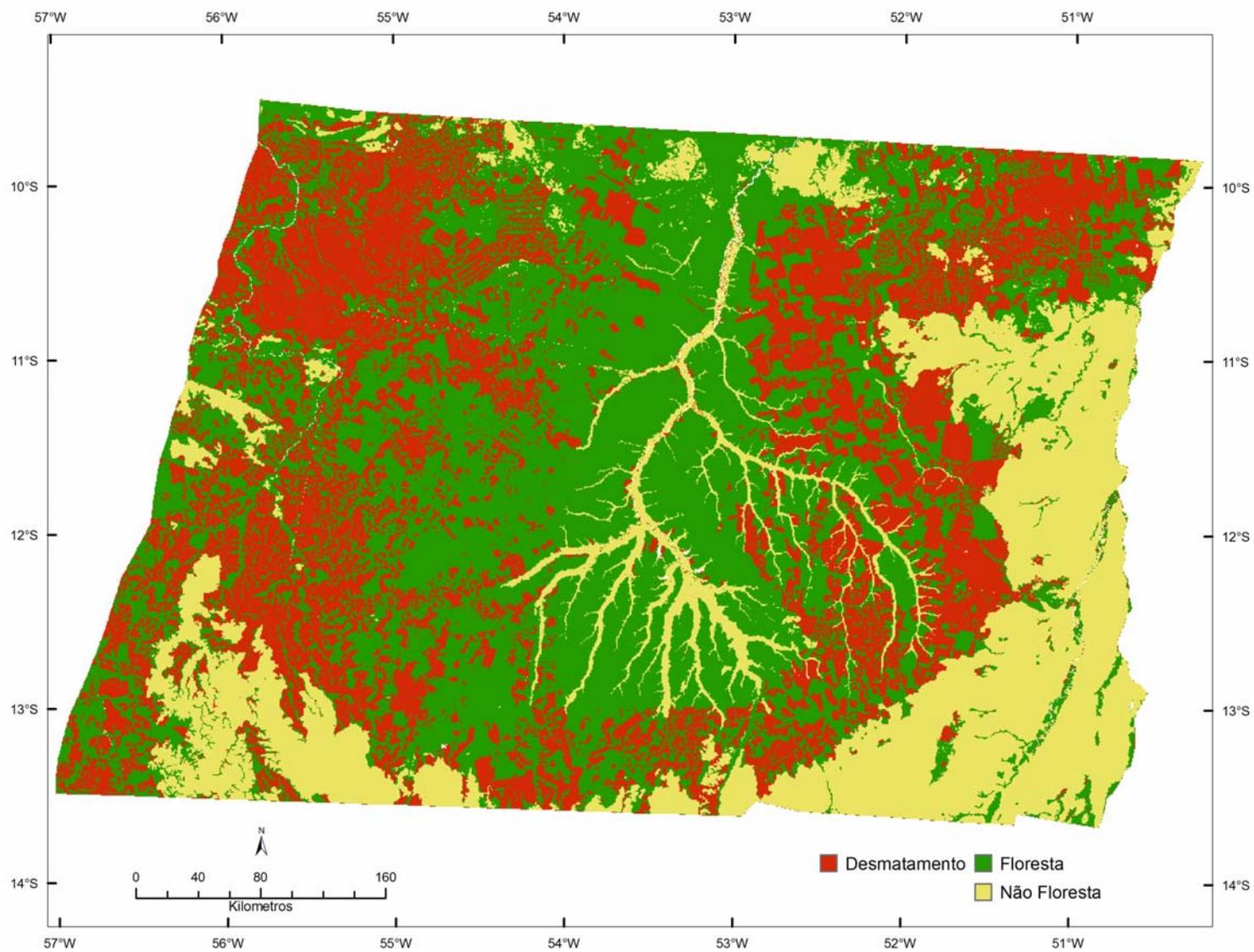


Figura 11a. Mapa do PRODES para o ano 2004.

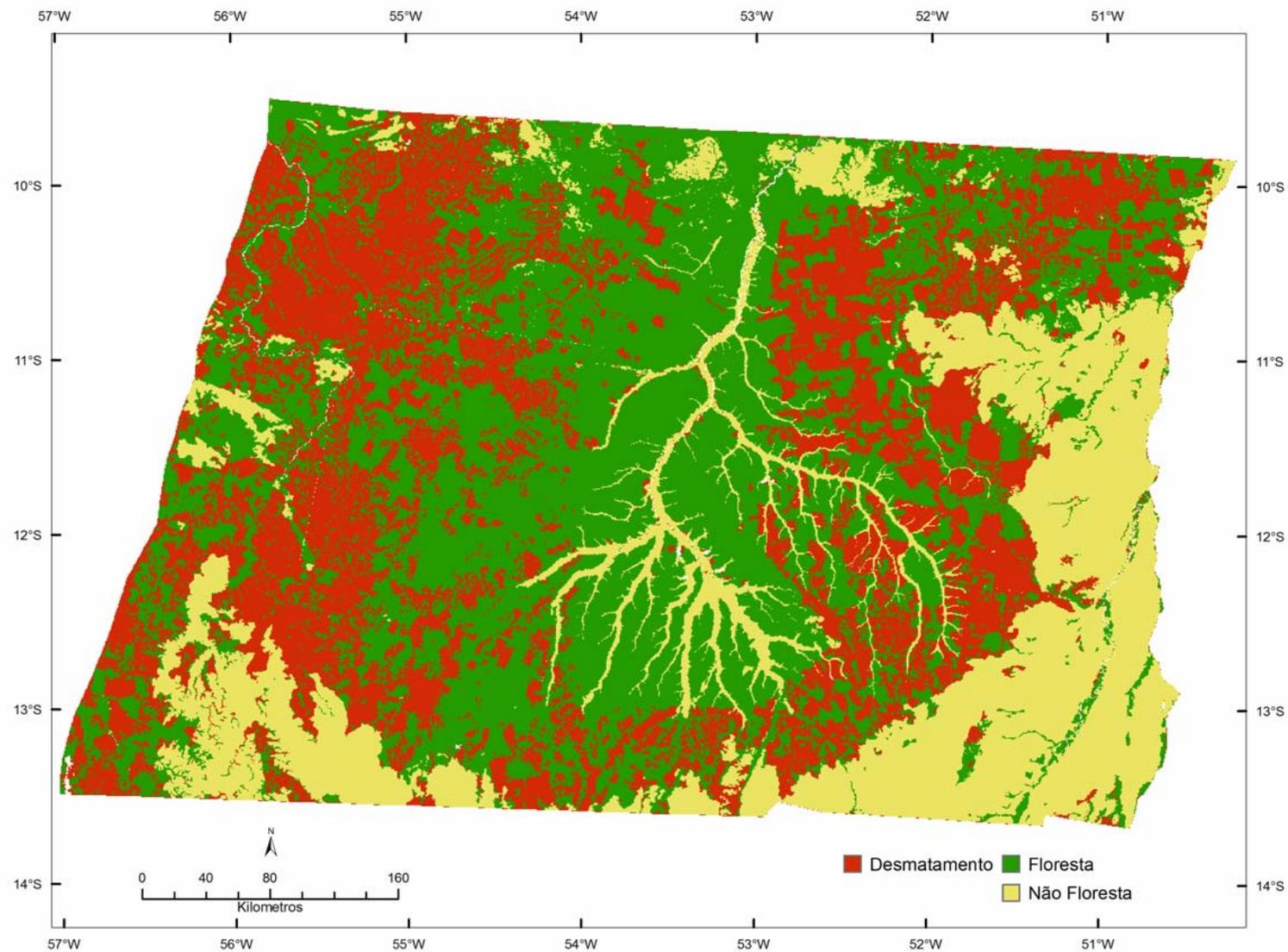


Figura 11b. Mapa simulado para o ano 2004

Os Cenários 2 e 3 apresentaram percentagens de área desmatada muito similares sendo um pouco maior no Cenário 3. Nos dois cenários, 50% da área estará desmatada até o ano 2012, mas a distribuição espacial do desmatamento difere. Para o ano 2025, obteve-se uma redução de 9% e 10%, respectivamente, na área desmatada em relação ao Cenário 1. Para os dois cenários, as áreas de florestas remanescentes para 2025 será de 38% (Figura 12b), mas alocada em diferentes situações.

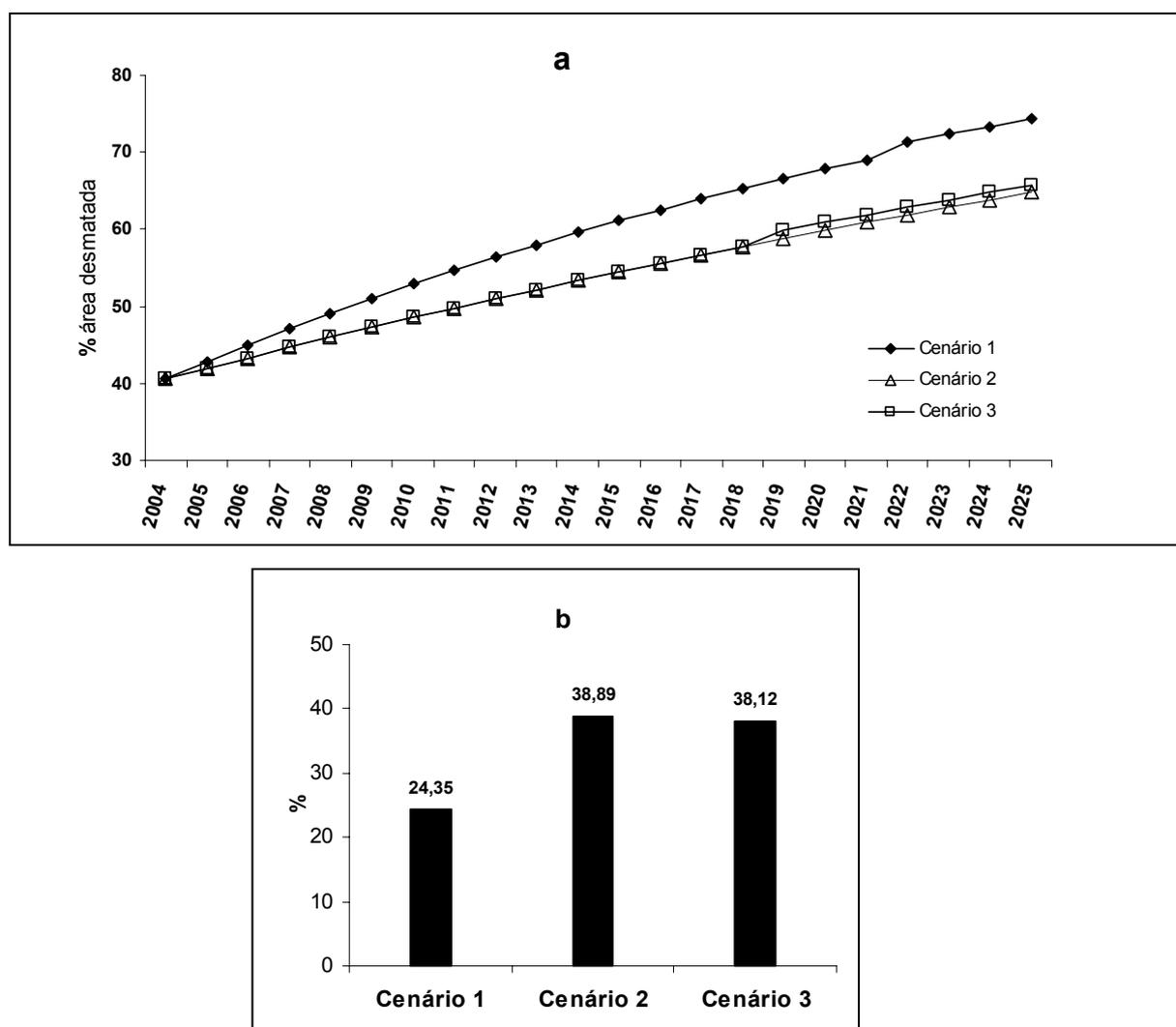


Figura 12. a) Evolução do desmatamento (percentagem de área desmatada) para os três cenários entre 2004 e 2025. b) Percentagem de floresta remanescente para os três cenários no ano 2025.

Excluindo-se as Terras indígenas e as Unidades de Conservação existentes, 100% da área estará desmatada no ano 2074 no caso do Cenário 2. No caso do Cenário 3, excluindo-se também as Unidades de Conservação projetadas, a área será totalmente desmatada em 2064.

Ao observar os mapas simulados, para o ano 2025, para cada um dos cenários (Figuras 13, 14 e 15), podemos apreciar melhor o efeito que cada um destes teve na evolução e distribuição espacial do desmatamento. No Cenário 1, quase a totalidade da área está desmatada. As áreas com floresta correspondem a 24% do total da área (Figuras 12b e 13), que correspondem principalmente ao Parque Indígena Xingu e, em uma proporção muito pequena, às Unidades de Conservação. Estas zonas ficaram completamente isoladas. As cabeceiras dos principais rios formadores do rio Xingu aparecem totalmente desmatadas.

Entre 2005 e 2025, o número de “fragmentos” (NP) de desmatamento diminuiu a metade passando de 3474 a 1754 (Figura 16a). Esta diminuição indica que, na medida em que os fragmentos foram aumentando estes foram-se fundindo ou unindo. Esta fusão se deu como resultado de um contínuo aumento na porcentagem da área contida pelo maior fragmento de desmatamento (LPI). A partir de 2014, os valores duplicaram, passando de 25% a 48% em 2017, nos anos seguintes este percentual apresentou um leve aumento, chegando a ocupar a metade da área em 2025 (Figura 16b). O desmatamento ocorreu de forma agregada como mostram os altos valores de (AI) na Figura 16c. A partir de 2014, registrou-se um forte incremento, até chegar a 94% em 2025.

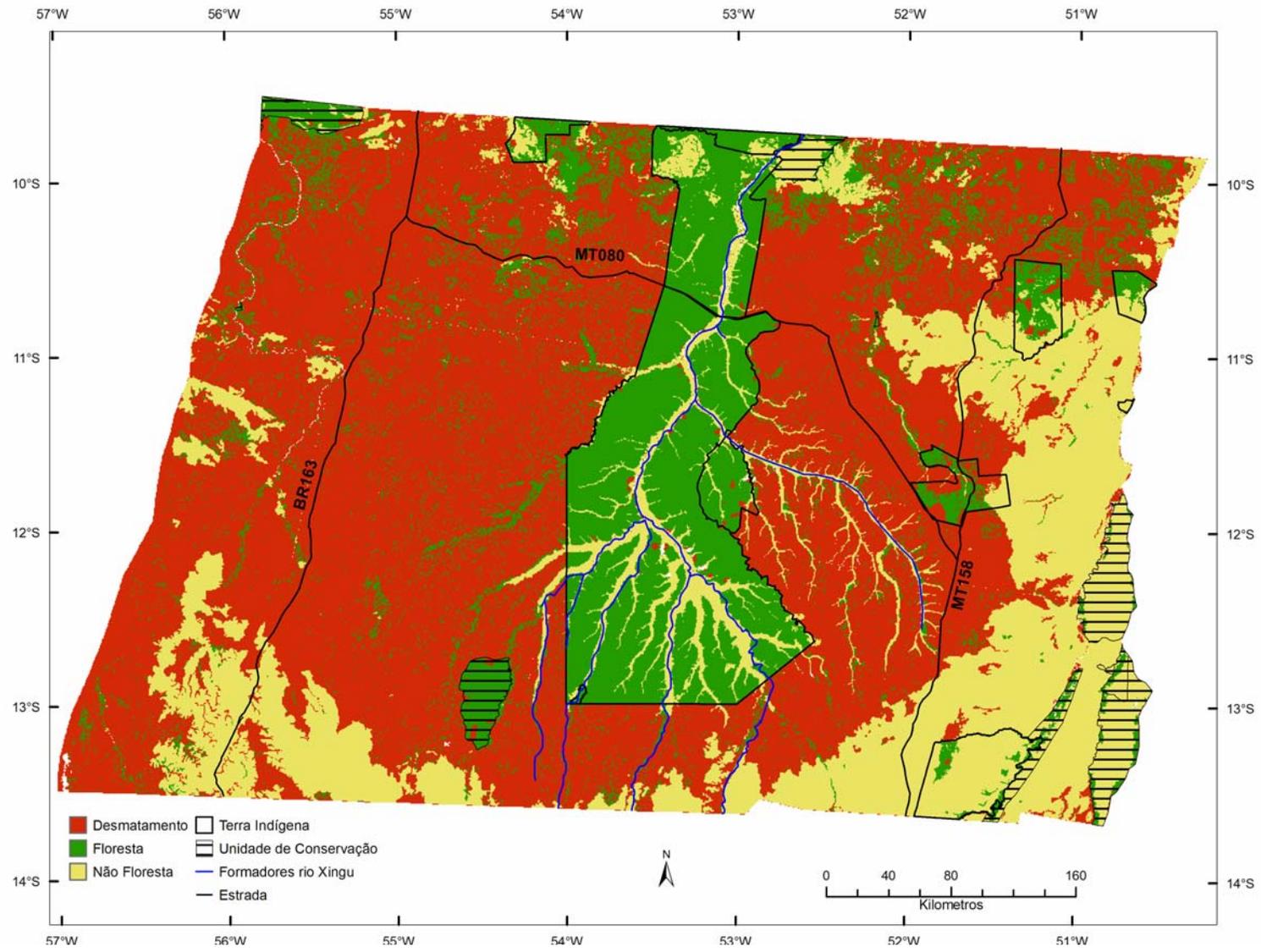


Figura 13. Mapa do Cenário 1 no ano 2025

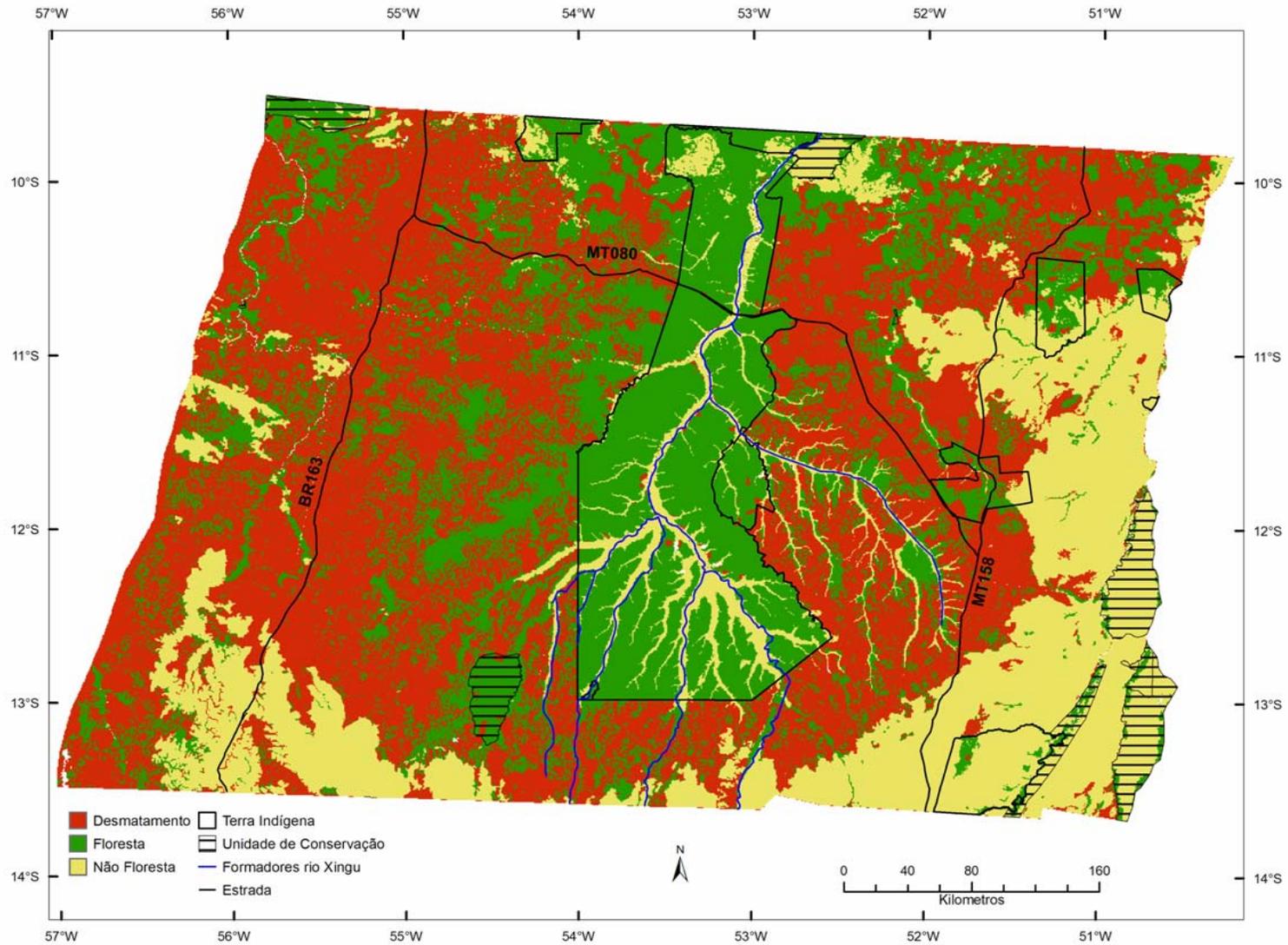


Figura 14. Mapa do Cenário 2 no ano 2025

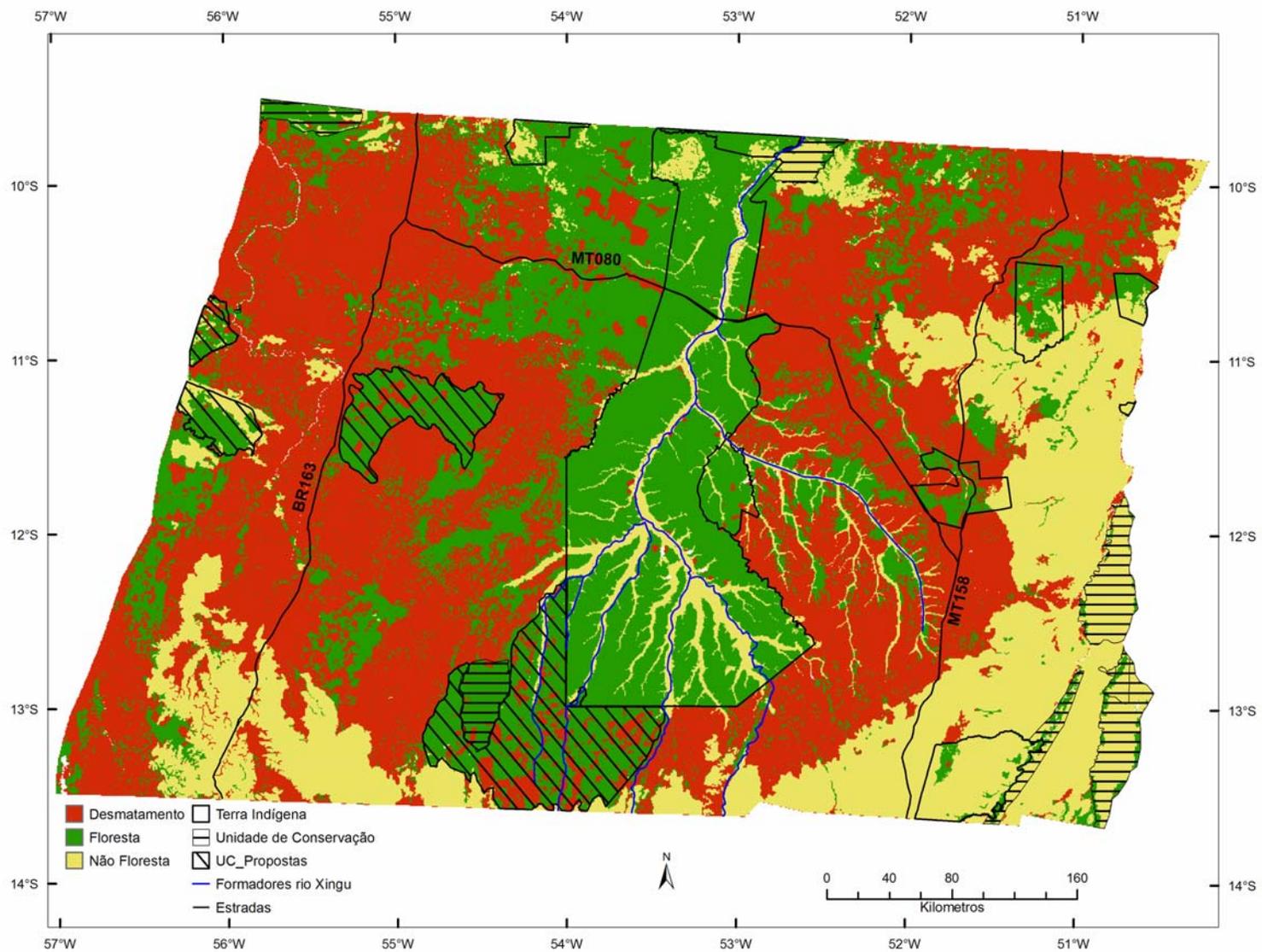


Figura 15. Mapa Cenário 3 no ano 2025

No Cenário 2, o desmatamento foi menor (Figura 14). Quanto maior a distância a estradas, mais aparecem áreas de floresta. A maior parte das florestas remanescentes estão no Parque Xingu. No entanto, pode-se observar importantes áreas de floresta fora do Parque Xingu e das Unidades de Conservação. Muitas destas estão conectadas às terras protegidas, fazendo com que estas não fiquem isoladas e exista maior conectividade das áreas de floresta na zona de estudo. Apesar de apresentar muito desmatamento, ainda se observam alguns remanescentes florestais nas cabeceiras do rio Xingu.

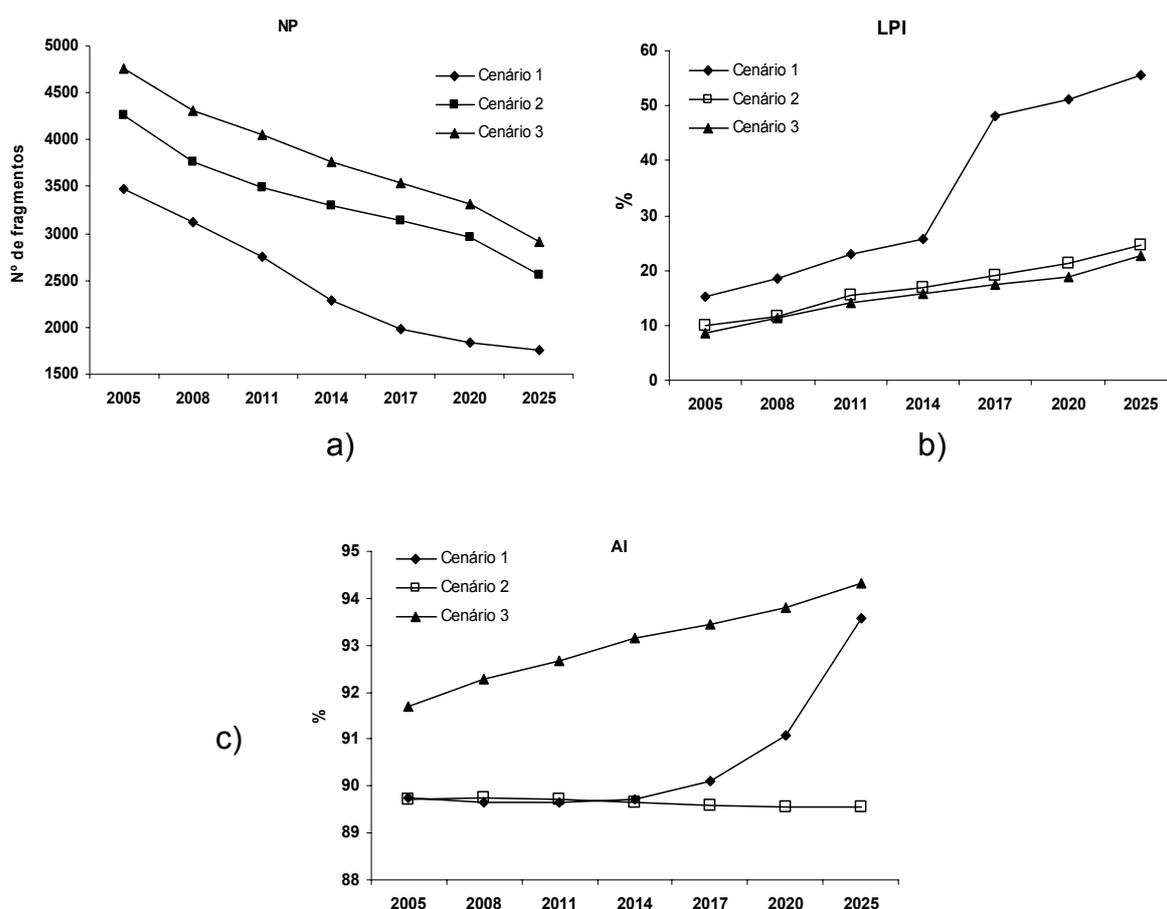


Figura 16. Medidas da estrutura da paisagem para a classe desmatamento da região nordeste do Mato Grosso: a) Número de fragmentos de desmatamento (NP). b) Porcentagem da paisagem contida pelo maior fragmento de desmatamento (LPI). c) Agregação dos fragmentos de desmatamento (AI) na paisagem.

Os índices de paisagem no Cenário 2 seguiram as mesmas tendências que no Cenário 1, mas os valores dos índices mudaram. O número de fragmentos de desmatamento (NP) foi maior, passando de 4263 em 2005 a 2554 em 2025 (Figura 16a). Foi registrada uma diminuição na área da paisagem contida pelo maior fragmento de desmatamento com respeito ao Cenário 1. No ano 2025, o LPI foi de 25%. O desmatamento ocorreu de forma agregada desde o começo da simulação e continuou praticamente constante até o ano 2025.

Observando o mapa do Cenário 3 (Figura 15), pode-se verificar uma marcada diferença na distribuição espacial do desmatamento com respeito ao Cenário 2. O desmatamento está mais concentrado que no Cenário 2. Este ocorreu com mais intensidade ao longo das rodovias e nos locais onde o desmatamento já existia. A área, em geral, apresentou áreas de floresta remanescente de maior tamanho. As Unidades de Conservação propostas claramente protegeram melhor as áreas que no Cenário 2 foram desmatadas. Resultando desta forma uma maior área de floresta nas bordas das terras protegidas e nas cabeceiras do rio Xingu.

O número de fragmentos (NP) de desmatamento aumentou consideravelmente com respeito aos Cenários 1 e 2, passando de 3470 em 2005 a 1754 no 2025 (Figura 16a). A área da paisagem ocupada pelo maior fragmento (LPI) de desmatamento diminuiu pela metade com respeito ao Cenário 1, e foi levemente menor que no Cenário 2 (Figura 16b). O desmatamento ocorreu de maneira mais agregada que nos Cenários 1 e 2 (Figura 16c).

3. Discussão

A aplicação da metodologia e conceitos do modelo DINAMICA na região nordeste do Mato Grosso mostrou que o modelo é capaz de representar o desmatamento de uma maneira realista. As variáveis proximais selecionadas mostraram o comportamento típico com respeito ao desmatamento (Geist & Lambin, 2001). O desmatamento na área de estudo teve maior probabilidade de acontecer perto de cidades, estradas e áreas desmatadas e longe dos rios. Esta tendência encontrada para os rios era esperada, porque os entornos dos rios, à exceção dos encontrados dentro do Parque Xingu, estão altamente degradados como consequência do descumprimento das leis ambientais que os protegem. Em áreas onde estão localizados assentamentos, a probabilidade também é maior. Tratam-se de projetos de colonização antigos que não tiveram o correto planejamento, acompanhamento e apoio do governo, razões pelas quais o desmatamento para a utilização e venda da madeira em um primeiro momento, e posterior desmatamento para implantação de agricultura e/ou pecuária ocorreram na quase totalidade das áreas.

As áreas protegidas diminuíram a probabilidade de ocorrência de desmatamento, resultado que coincide com recentes estudos sobre a importância das áreas protegidas na contenção e redução do desmatamento (Ferreira *et al.*, 2005; Nepstad *et al.*, 2006). A maior efetividade encontrada nas Terras Indígenas em relação às Unidades de Conservação não pode ser tomada em conta, uma vez que estas unidades já apresentavam algum desmatamento antes de serem

implementadas, e estas diferenças não são consideradas no cálculo dos pesos de evidência.

Em geral, solos férteis e relevos planos têm tendência a serem mais desmatados (Chomitz & Gray, 1996; Mertens *et al.*, 2004). Contudo, na região, o tipo de solo tem menor importância na atualidade, por ser a soja o cultivo principal. Este cultivo é altamente tecnificado e dependente de insumos químicos, pouco importando o tipo de solo. Pesquisadores da EMBRAPA ressaltaram esta característica e indicaram a disponibilidade de água e terreno plano como sendo os fatores determinantes na escolha do terreno para a implantação do cultivo. A maioria da área de estudo apresenta relevo plano, sendo apta para a agricultura tecnificada nos moldes da soja, enquanto que nos locais com relevo ondulado é mais comum a implantação da pecuária.

É importante ressaltar que a influência das variáveis proximais sobre o desmatamento não é o resultado da ação de cada uma individualmente, senão uma complexa relação de diferentes fatores e variáveis. A maioria delas leva em conta a ação de diferentes variáveis causais que têm sua origem em complexos processos sociais, políticos e econômicos, os quais não são diferenciados pela técnica usada.

Como mostra o resultado do Cenário 1, que mantém a tendência atual, é muito provável que em poucos anos a floresta desapareça quase por completo (Figura 12). Esta drástica previsão para a área de estudo corresponde, como mostrado por outros modelos, tanto para a Amazônia como para regiões dentro do

Estado do Mato Grosso (Laurance *et al.*, 2001; Soares-Filho *et al.*, 2004; Soares-Filho *et al.*, 2005).

As Terras Indígenas e Unidades de Conservação são as únicas áreas preservadas, evidenciando a importância das áreas protegidas e a urgência de implementação de novas áreas ou ampliação das já existentes. As cabeceiras do rio Xingu aparecem completamente desmatadas. Nestas áreas, o Instituto Sócio Ambiental (ISA) está realizando, junto às comunidades indígenas, fazendeiros e comunidade em geral, campanhas para recuperação da mata ciliar; contudo, a situação carece de um esforço maior de gestão e controle por parte dos governos municipal, estadual e federal.

Os índices da paisagem corroboram para evidenciar a difícil situação em que se encontra a área de estudo no sentido de manter as tendências atuais. A diminuição no número de fragmentos de desmatamento mostra como o aumento do desmatamento faz com que os fragmentos se unam, resultando em fragmentos maiores (Figura 13). Este fenômeno foi mais evidente no marcado incremento apresentado pelo LPI entre o ano 2014 e 2017, período no qual dois fragmentos de grande tamanho se uniram formando uma grande mancha que ocupou 50% da paisagem. A fusão não só aconteceu com os fragmentos de maior tamanho, mas esta foi uma tendência geral do desmatamento, como indicam os altos valores de agregação apresentados (Figura 16c). As tendências apresentadas pelas métricas podem ser usadas para inferir a influência que o desmatamento geraria na estrutura da floresta remanescente. Na escala regional deste trabalho (nordeste do Mato Grosso), a principal consequência será o paulatino aumento da fragmentação e, por conseguinte, a perda de conectividade, fenômeno que acarreta graves

conseqüências ao meio ambiente físico e biogeográfico, sendo os mais importantes: i) alterações micro climáticas (fluxos de radiação, vento e água), ii) mudanças na composição, estrutura e dinâmica florestal, iii) diminuição na área total de habitat disponível para a biota, iv) aumento do isolamento entre os habitat remanescentes (Saunders *et al.*, 1991; Forman, 1995; Laurance *et al.*, 2000; Laurance & Williamson, 2001).

Diante da difícil situação do desmatamento, o governo federal reagiu criando o Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal que, além de outras ações, prevê a criação de cinco postos de controle permanentes no Estado do Mato Grosso. A isto se somam um fortalecimento da fiscalização e operações de controle do desmatamento. Segundo a Diretoria de Fiscalização do IBAMA, estas ações diminuiriam a taxa anual de desmatamento entre 25 e 30% em 2005 e poderiam chegar a uma redução de 50% no futuro. Esta foi a situação que se tentou representar no Cenário 2 (Figura 14) e foi mantida até 2025. Este tipo de ação por parte do governo diminuiria em 9% o desmatamento, tornando evidente que a fiscalização sem uma aplicação real de planos alternativos que ajudem a preservar a floresta remanescente não mudaria muito o trágico panorama mostrado no Cenário 1.

Como mostra o resultado, as áreas protegidas existentes ou projetadas são muito importantes na conservação das florestas. Já as áreas de influência das rodovias assim como as cabeceiras do rio Xingu mostram um marcado incremento do desmatamento, evidenciando a necessidade de se criarem novas áreas de

proteção nestes pontos críticos, a fim de conter este avanço e preservar os remanescentes florestais existentes.

Como se esperava, uma redução nas taxas de desmatamento influenciou positivamente na estrutura da paisagem. A diminuição do desmatamento apresentada neste cenário levou a uma menor fusão dos fragmentos de desmatamento, como mostra o fato da redução pela metade da porcentagem de paisagem ocupada pelo maior fragmento (Figura 16b) com respeito ao Cenário 1. A diminuição no número de fragmentos de desmatamento ao longo da simulação indica a fusão destes, mas em um grau menor do que no Cenário 1, indicado pelo maior número de fragmentos de desmatamento (Figura 16a). Estes fatos são reforçados pelo menor grau de agregação apresentada pela paisagem (Figura 16c). Estas características espaciais do desmatamento indicam uma diminuição na fragmentação da paisagem e uma maior conectividade entre as manchas de floresta remanescentes, características estas que diminuiriam os efeitos causados pela fragmentação mencionados anteriormente.

Vale a pena ressaltar, como indica o Greenpeace (Marquesini *et al.*, 2005), que o plano estruturante do governo não foi aplicado conforme era planejado, e muitas ações ainda estão por se realizar. Desta forma, a diminuição do desmatamento apresentada no ano de 2005 não foi só o resultado destas ações estruturantes levadas pelo governo. A estas ações se somaram três fatores principais: i) A operação “Curupira” realizada pela Polícia Federal em junho de 2005, que resultou na detenção de madeireiros, fazendeiros e funcionários públicos estaduais e federais; ii) o momento desfavorável para as “commodities” agrícolas brasileiras no mercado internacional, principalmente o mercado da soja; iii) o câmbio

do dólar que se mostrou desfavorável às exportações; iv) o assassinato da missionária Dorothy Stang, que gerou uma rápida reação do governo, aumentando a sua presença na região amazônica.

É evidente a falta de Unidades de Conservação na área de estudo. A maior proporção de áreas protegidas corresponde às Terras Indígenas, e destas, o Parque Xingu ocupa a maior proporção. O IBAMA não tem projetado nenhuma nova Unidade de Conservação para a região. Esta situação preocupante levou o governo estadual a planejar a criação de algumas novas unidades. O resultado do Cenário 3 mostra a importância que esta iniciativa teria na distribuição do desmatamento. Além de diminuir o desmatamento com relação ao Cenário 1, a distribuição espacial da paisagem mostra uma menor fragmentação, e áreas maiores conectadas às áreas protegidas existentes conferem maior proteção a algumas das cabeceiras do rio Xingu (Figura 15).

Como mostra o Cenário 3 no ano 2025 (Figura 15), a zona de influência das rodovias BR 158 e MT 80 e as áreas de transição com cerrado estarão quase que completamente desmatadas, evidenciando a necessidade de criação de novas Unidades de Conservação nestas zonas a fim de preservar estes remanescentes florestais.

A diminuição de mais de 50% na porcentagem de área ocupada pelo maior fragmento de desmatamento e o aumento no número de fragmentos de desmatamento com respeito ao Cenário 1 (Figura 16) mostram que a diminuição das

taxas de desmatamento junto à criação de novas Unidades de Conservação seria uma boa estratégia para diminuir a fragmentação da paisagem e garantir a preservação de uma maior porcentagem de floresta (38%).

O Cenário 3 apresentou os maiores índices de agregação (Figura 16c), além da fusão dos fragmentos pelo aumento do desmatamento. Este índice foi influenciado pela forma como o modelo DINAMICA aloca o desmatamento. Todo o desmatamento que não foi alocado nas novas áreas de conservação tem que ser adicionado a outras áreas, aumentando desta forma a agregação em certas zonas, o que pode ter gerado uma variação nos valores obtidos.

Ao analisar os índices dos Cenários 2 e 3 (Figura 16), não foi encontrada uma diferença clara que permita saber qual dos dois representaria uma melhor estratégia para diminuir o desmatamento, reduzir a fragmentação e aumentar a conectividade entre remanescentes florestais. Uma análise visual dos mapas resultantes do modelo para o ano 2025 (Figura 14 e 15) amostra algumas vantagens. Como foi mencionado anteriormente, a paisagem do Cenário 3 possui manchas de floresta maiores. Esta característica é importante, porque manchas maiores sofrem menor influência dos efeitos ambientais e bióticos associados aos efeitos de borda causados pela fragmentação (Saunders *et al.*, 1991). Além disto, uma destas manchas protegeria algumas das principais cabeceiras do rio Xingu.

Limitações do Modelo

Os mapas de desmatamento disponibilizados pelo projeto PRODES foram os únicos com que se contou para a implementação do modelo. O fato destes mapas só representarem uma transição (floresta a desmatamento), bem como o fato de que o desmatamento foi assumidamente cumulativo ao longo do tempo, sem-se tomar em conta uma possível regeneração florestal, limitaram as possibilidades de representar cenários mais reais.

O uso de uma taxa de transição fixa para calibrar e validar o modelo não foi uma representação muito fiel da realidade uma vez que as taxas de desmatamento flutuam com o tempo, conforme pode ser observado na Tabela 1. Apesar disto, obteve-se um índice de similaridade de 51%, o que pode ser considerado bastante aceitável.

Para poder variar a taxa de transição ao longo do tempo o DINAMICA possui uma ferramenta que permite acoplar outro tipo de modelo, o VENSIM, o qual calcula as taxas de transição baseadas na modelagem de processos sociais, políticos e econômicos. No presente estudo, não foi usada esta possibilidade porque a modelagem deste tipo de processos é complicada, é necessário ter-se um amplo conhecimento tanto dos processos a modelar quanto do programa em questão. Assim sendo, foi destinado um maior esforço na compreensão e aplicação dos conceitos e metodologia do DINAMICA, e postergou-se a utilização do VENSIM para futuros estudos.

O uso exclusivo das variáveis proximais selecionadas mostrou ser efetivo para representar o desmatamento. No entanto trata-se apenas de uma

representação bastante simplificada, que só aborda uma parte da complexa problemática do desmatamento na região. Por trás das variáveis proximais estão atuando variáveis causais, as quais representam complexos processos socioeconômicos. E como foi anotado anteriormente, estas podem entrar no modelo dos resultados do VENSIM, possibilitando um melhor desempenho do modelo e uma melhor compreensão da problemática do desmatamento.

4. Conclusões

Para a região nordeste do Estado do Mato Grosso e tendo em conta a resolução espacial utilizada (250 m), a metodologia e conceitos do modelo DINAMICA mostraram ser eficientes para simular o desmatamento e trajetórias futuras segundo a influência de variáveis proximais.

O desmatamento na região de estudo teve maior probabilidade de ocorrer nas áreas próximas às cidades, estradas e áreas desmatadas e longe dos rios. As Terras Indígenas e as escassas Unidades de Conservação federais diminuíram as probabilidades de desmatamento localmente, e as áreas com assentamentos registraram uma maior probabilidade de serem desmatadas. O tipo de solo e o relevo tiveram pouca influência na ocorrência de desmatamento.

Se as tendências atuais de desmatamento se mantiverem, no ano 2025, 70% da área da região nordeste do Mato Grosso estará desmatada, apresentando uma paisagem fragmentada na qual grandes fragmentos de desmatamento ocupariam a metade da área, gerando graves conseqüências ao meio ambiente físico e

biogeográfico (Cenário 1). As escassas florestas remanescentes ficariam isoladas e, quase em sua totalidade, no interior do Parque do Xingu.

Uma redução de 50% na taxa anual de desmatamento levaria a apenas 9% de redução na área desmatada entre 2005 e 2025 se baixar a taxa anual for a única mudança (i.e., não há novas áreas protegidas criadas) (Cenário 2), dando como resultado uma paisagem menos fragmentada e com maior conectividade entre os fragmentos de floresta remanescentes.

Se uma efetiva ação de controle do desmatamento por parte do governo se somasse à criação das novas Unidades de Conservação planejadas pelo governo estadual, isto permitiria diminuir a área desmatada em 10% até o ano 2025, e a paisagem da região apresentaria maiores manchas de floresta remanescentes, protegendo assim uma parte mais importante das principais cabeceiras do rio Xingu.

Os três cenários simulados evidenciaram a importância das áreas de conservação na preservação da floresta, ressaltando, além disto, a grande importância que o Parque do Xingu representa para o Estado do Mato Grosso.

Capítulo 2

Modelagem do Desmatamento no Município de União do Sul – Mato Grosso

Introdução

Estudos relacionados com a modelagem espacial de mudanças de uso da terra têm ressaltado a influência que a extensão e a resolução espacial (tamanho do pixel) escolhidas podem ter nos resultados de um modelo. Uma resolução mais fina (menor tamanho do pixel) aumentará a heterogeneidade, enquanto uma extensão menor pode diminuir o número de processos relacionados com o uso da terra, e processos que antes eram importantes podem perder importância. Além disso, o mesmo processo pode atuar de forma diferente em diferentes partes da área de estudo (Turner *et al.*, 1995; Kok & Veldkamp, 2001; Veldkamp *et al.*, 2001). Neste sentido, é importante avaliar como se comporta um modelo espacial frente às variações tanto na extensão como na resolução espacial de uma mesma área.

Na região nordeste do Estado do Mato Grosso, o desmatamento encontra-se localizado em pontos críticos concentrados ao longo das rodovias BR 163, BR 158 e MT 80 (Alencar *et al.*, 2004). Dentro desta região, o desmatamento ocorre de maneira diferenciada. Uma análise do desmatamento dos dados disponibilizados pelo projeto PRODES (INPE, 2005) na escala de município mostra que, até o ano 2004, dos 37 municípios que se encontram dentro da área delimitada no Capítulo 1, dez apresentavam mais de 50% das suas áreas desmatadas, 19 entre 20% e 50% de suas áreas desmatadas, e oito apresentam menos de 20%. Dentro do último grupo, o município de União do Sul é o único cuja área está totalmente fora do

Parque Xingu e não tem a presença de cerrado nos seus limites. Estas características fazem com que a área do município seja uma boa opção para poder avaliar como se comporta o modelo implementado no Capítulo 1, variando-se tanto a extensão como a resolução espacial.

Objetivos

1. Implementar um modelo espacial para simular o desmatamento no município de União do Sul, no Estado do Mato Grosso, usando uma resolução espacial de 90 m.
2. Usando o modelo espacial DINAMICA simular cenários futuros para avaliar a resposta do desmatamento às mesmas variáveis proximais usadas no Capítulo 1.
3. Caracterizar a mudança da paisagem ao longo do tempo para cada um dos cenários simulados.

1. Métodos

1.1 Área de Estudo

O município de União do Sul, com uma área de 4.700 km², encontra-se localizado na região nordeste do Estado do Mato Grosso (Figura 18). As principais formações vegetais do município são florestas ombrófila aberta e densa. O município apresenta uma altitude média de 300 m. Os solos na zona são principalmente latossolos. A temperatura média anual é de 24 °C, e a precipitação anual de 2.500 mm.

Dentro da área do município as Terras Indígenas e as Unidades de Conservação inexistem.

A colonização do município é recente. Na década de 1980, começaram a chegar os primeiros colonizadores com o objetivo de exploração da floresta e plantio de seringa. O município foi oficialmente criado em 1995 (Ferreira, 2001). Na sua curta história, as principais atividades têm sido a exploração madeireira, agricultura de soja e pecuária. Estas atividades têm tido um rápido crescimento nos últimos anos, como podemos observar na Figura 17.

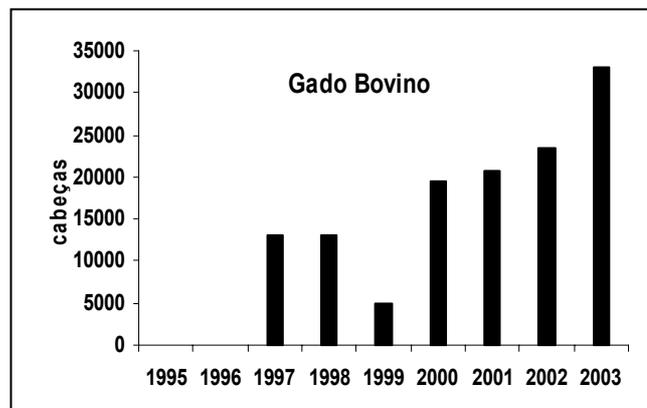
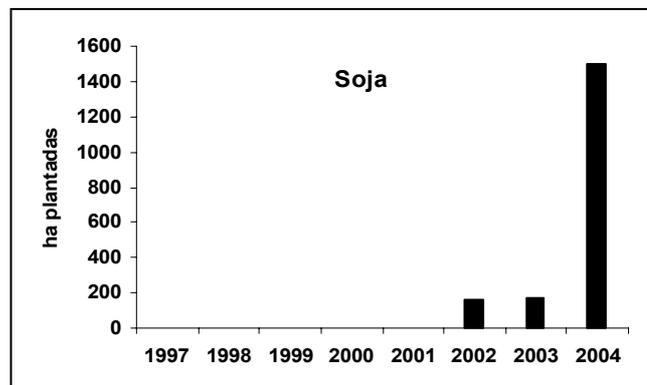
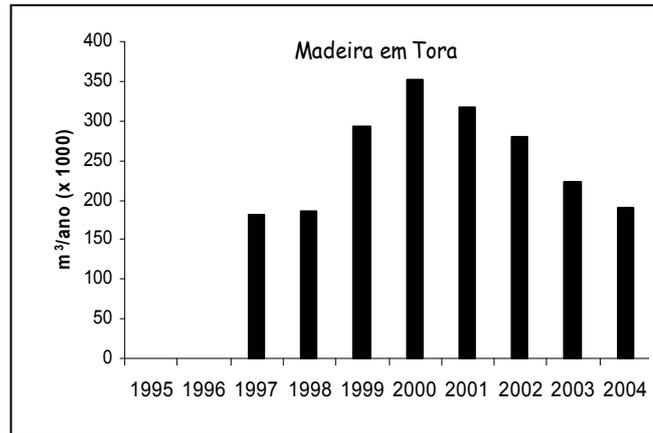


Figura 17. Atividade madeireira, área de soja plantada e número de cabeças de gado bovino no município de União do Sul.

A exploração madeireira é uma atividade importante na atualidade. No município, existe um pólo madeireiro com 25 empresas madeireiras que apresentam um consumo anual de 390.000 m³ de madeira (toras) (Lentini *et al.*, 2005).

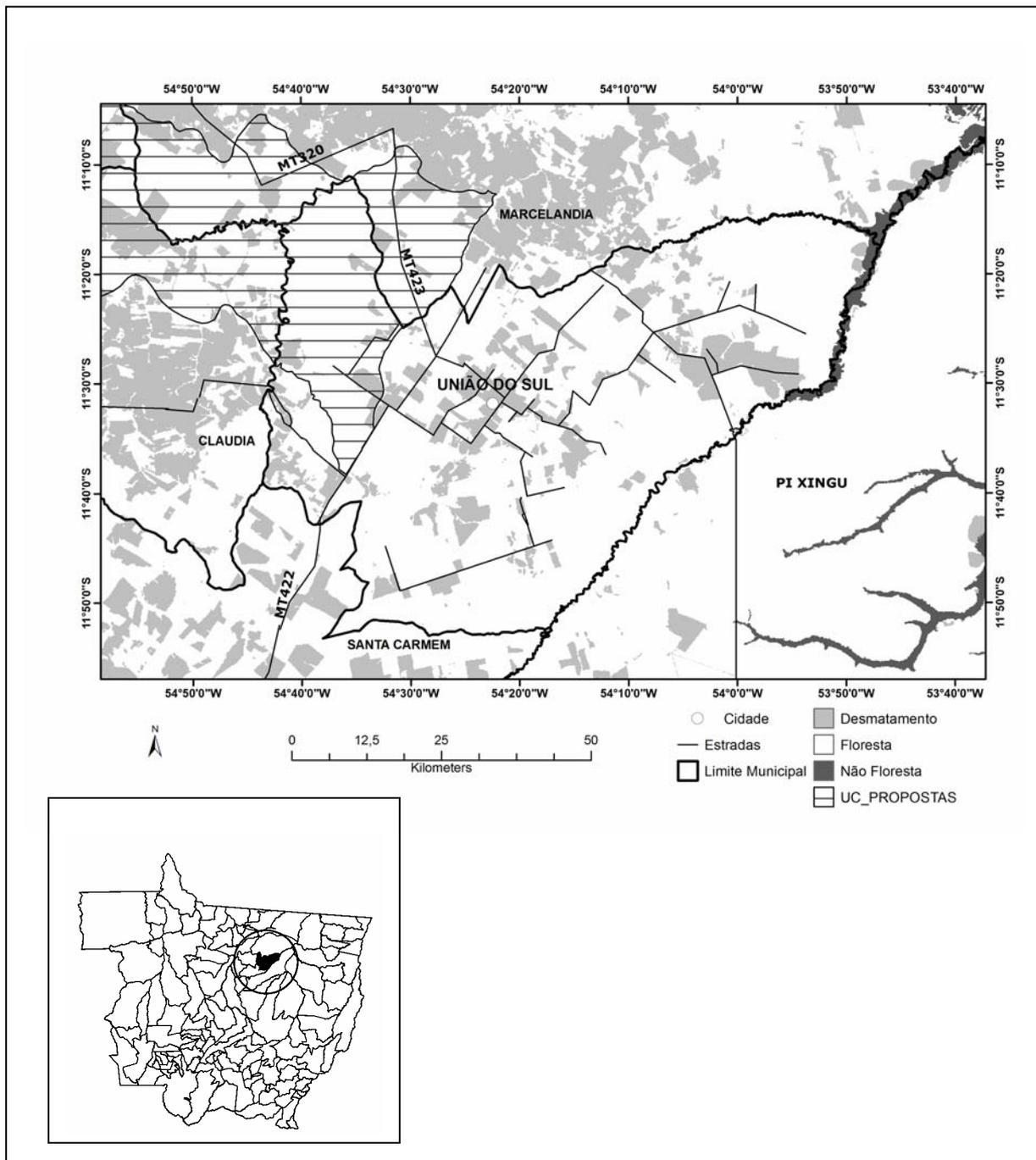


Figura 18. Município de União do Sul e sua localização no Estado do Mato Grosso.

Segundo dados do INPE (2005), o município tem 82% de florestas remanescentes incluindo florestas exploradas e 17% de sua área foi desmatada até

2004. Coincidentemente, estas são as mesmas percentagens que se aplicaram na época à floresta amazônica brasileira como um todo (INPE, 2005).

1.2 Implementação do Modelo

A modelo foi implementado segundo os conceitos e metodologia do modelo DINAMICA, de forma similar à descrita no Capítulo 1 (Figura 19). Algumas partes da metodologia variaram e serão tratadas com maior detalhe a seguir.

1.2.1 Configuração Inicial

- Resolução Espacial

Os diferentes mapas usados no desenvolvimento do modelo foram transformados em formato raster com uma resolução de 90 m, dando como resultado uma matriz de 1.155 x 865 células para toda a área do município. Para isto, foram usados os programas ArcGis 9.0 e ER Mapper 6.4.

- Mapas de Entrada

a) Mapas de Uso de Solo

Como mapas de uso de solo, foram usados os mapas de desmatamento fornecidos pelo PRODES (INPE, 2005) para os anos 2000 e 2004. Os mapas apresentam três

classes: desmatamento (1), floresta (2) e não floresta (3). Foi realizado um recorte da área do município de União do Sul, usando-se os programas ArcGis 9.0 e ER Mapper 6.4.

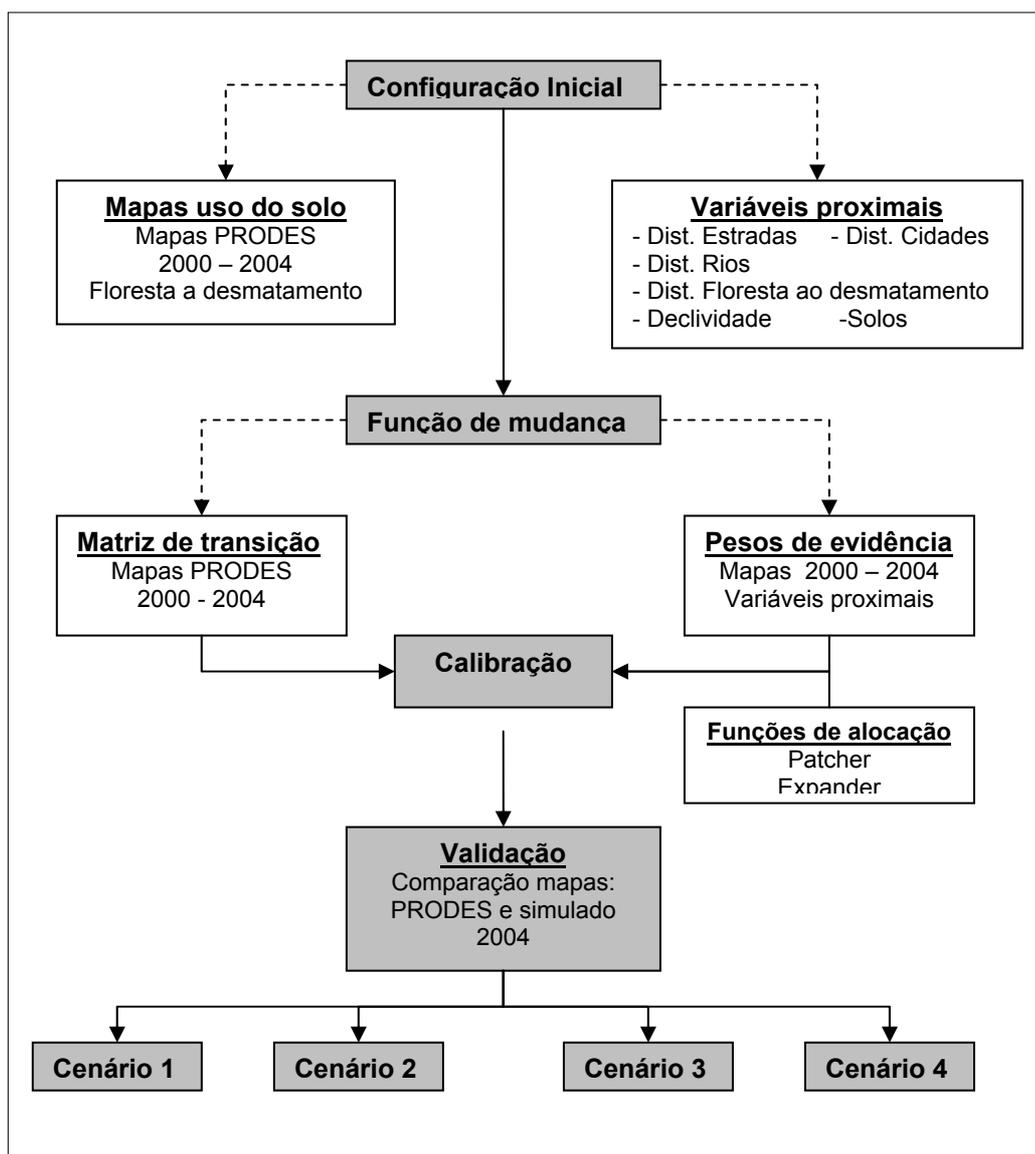


Figura 19. Representação da metodologia usada para o desenvolvimento do modelo. Ver informação teórica de cada etapa no Capítulo 1, Item 1.2.

b) Variáveis Proximais

As variáveis proximais foram representadas usando-se os mapas das mesmas fontes citadas no Capítulo 1, e os mesmos critérios e metodologia foram usados para gerá-las. Foi realizado um recorte para a área do município, e todos os mapas foram convertidos em formato raster com uma resolução de 90 m. Todas as operações necessárias para a obtenção das variáveis foram realizadas usando-se os programas ArcGis 9.0, ER Mapper 6.4 e DINAMICA 2.4.

Para todas as variáveis de distância, foi calculada a distância euclidiana a partir do ponto representado até o final do mapa em intervalos de 90m que foi a distância mínima imposta pelo tamanho da célula.

As seguintes variáveis proximais foram usadas no modelo:

- Distância a estradas
- Distância a rios
- Distância a cidades
- Distância de floresta ao desmatamento
- Declividade
- Solos

Devido à inexistência de Terras Indígenas, Unidades de Conservação e assentamentos no município, estas variáveis não foram usadas para o desenvolvimento do modelo.

1.2.2 Função de Mudança

Tanto a matriz de transição como os pesos de evidência foram calculados com a mesma metodologia do Capítulo 1, Item 1.2.2. A matriz de transição foi calculada para o período 2000 a 2004 em passos anuais, usando-se os mapas de desmatamento fornecidos pelo PRODES. Os pesos de evidência foram calculados para cada uma das variáveis proximais escolhidas para o período compreendido entre 2000 e 2004. Para o cálculo da matriz de transição e os pesos de evidência, foram usados os correspondentes módulos do programa DINAMICA 2.4.

1.2.3 Calibração e Validação do Modelo

Para calibrar o modelo, foi rodada uma simulação de quatro anos a partir do ano 2000. O modelo foi executado várias vezes, variando-se os pesos de evidência e a porcentagem das funções de alocação até se obter o melhor ajuste possível.

Para validar o modelo, foram comparados o mapa simulado e o mapa original fornecido pelo PRODES para o ano 2004, usando-se o método fuzzy modificado (Hagen, 2003) usando uma janela de 5 x 5.

1.3 Cenários Futuros

Uma vez validado o modelo, foram simuladas tendências futuras do desmatamento, estabelecendo-se quatro situações distintas para um período compreendido entre 2004 e 2025.

O primeiro cenário, denominado **Cenário 1**, procurou representar a continuidade das tendências históricas do desmatamento no município, as quais foram mantidas constantes até o ano 2025. Para calibrar o modelo, a taxa de transição foi mantida constante ao longo do tempo, e os pesos de evidência das variáveis não foram modificados.

Nos três cenários adicionais foi usada uma nova variável proximal. Uma das unidades de conservação projetadas pelo governo estadual fica parcialmente dentro da área do município (Figura 18). A variável foi adicionada à camada de variáveis proximais, e os pesos de evidência foram recalculados e usados na simulação dos cenários.

Além da nova variável, nos três cenários adicionais foi assumido um fato hipotético, no qual o governo estadual do Mato Grosso, procurando soluções para diminuir o desmatamento, decidiu impor um sistema de cotas de desmatamento por ano e por município. As cotas seriam atribuídas aos municípios em função da montante já desmatada que cada um possui. Desta forma, Estados e municípios estariam comprometidos no controle e fiscalização do desmatamento, reforçando as atividades de controle exercidas por parte do IBAMA, e poderiam cumprir com os preceitos das reservas legais.

Para representar esta situação, foi usado um algoritmo do DINAMICA denominado “valor de saturação”. Este algoritmo permite controlar a taxa de transição que está sendo simulada (floresta-desmatamento). O parâmetro atua sobre o número de células que serão mudadas a cada ano, diminuindo o número

destas de acordo com a percentagem escolhida. O parâmetro é aplicado para cada ano simulado.

Foram representadas três cotas de desmatamento no município de União do Sul: o **Cenário 2** representou o caso hipotético de permitir uma cota anual de 80% de desmatamento, esta cota representa uma eventual continuação do desmatamento e da expansão agropecuária, mas com um pouco mais de controle por parte do Estado. O **Cenário 3** representou uma diminuição da cota, definindo-a em 50%. Este percentual estaria mais próximo da realidade, considerando a diminuição de 40% nas taxas de desmatamento estimadas pelo INPE para o ano 2005. E por último, o **Cenário 4** representando uma cota de 20%. Este seria um cenário mais otimista, pois corresponde a uma aplicação mais estrita das leis ambientais e tenderia a preservar maior área de floresta ao longo do tempo.

1.4 Estrutura da Paisagem

Para caracterizar a variação na estrutura da paisagem para cada um dos cenários, foram usados quatro índices de paisagem (Tabela 4). Os índices foram selecionados por serem reportados por diferentes estudos como sendo úteis e suficientes para caracterizar a estrutura básica de uma paisagem e cobrir alguns aspectos da fragmentação (Forman, 1995; Riitters *et al.*, 1995; Gustafson, 1998; Herzog *et al.*, 2001; Imbernon & Branthomme, 2001; de Barros Ferraz *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2005). O mapa original do ano 2004 fornecido pelo PRODES mostra que a paisagem do município de União do Sul está dominada por floresta, 82% da área

corresponde a floresta, constituindo um grande maciço único (Figura 18). Esta característica não permitiu aplicar as métricas da paisagem para a classe floresta. Por esta razão os índices foram calculados para a classe desmatamento, com o intuito de avaliar a evolução desta e suas implicações nas mudanças da estrutura da paisagem. Os índices foram calculados para cada um dos anos simulados no período compreendido entre 2005 e 2025, usando-se o programa FRAGSTATS 3.3 (McGarigal *et al.*, 2002).

Tabela 4. Lista de índices de paisagem utilizados para avaliar a estrutura da paisagem do município de União do Sul para cada um dos cenários no período de 2005 a 2025. Para maiores detalhes, consultar (McGarigal *et al.*, 2002).

Índice	Descrição	Descrição
NP	Number of Patches	Contabiliza o número de fragmentos de cada classe
LPI (%)	Large Patch Index	Quantifica o total de área contida pelo fragmento de maior tamanho de cada classe. Os valores vão de 0 (nenhum fragmento) até 100 (1 fragmento ocupa toda a área)
AI (%)	Aggregation Index	Quantifica o nível de agregação dos fragmentos de cada classe. Os valores vão de 0 (máxima desagregação) até 100
SHAPE_AM	Area weighted mean of the shape index distribution	Mede a complexidade na forma dos fragmentos de cada classe. Os valores vão de 1 até infinito. Valores altos representam formas mais complexas

2. Resultados

Para o período entre 2000 e 2004, a taxa de transição de floresta a desmatamento calculada foi de 0,020 e foi usada como taxa de desmatamento fixa para todos os anos simulados.

2.1 Efeito das Variáveis Proximais sobre o Desmatamento

O efeito das variáveis proximais sobre o desmatamento para o período compreendido entre 2000 e 2004 está representado nas Figuras 20 a 22.

As variáveis tiveram tendências similares às apresentadas para a região nordeste de Mato Grosso no Capítulo 1.

Próximo às estradas, a probabilidade de desmatamento foi maior. Esta tendência foi diminuindo até chegar aos 10 km, limite da zona de influência (Figura 20).

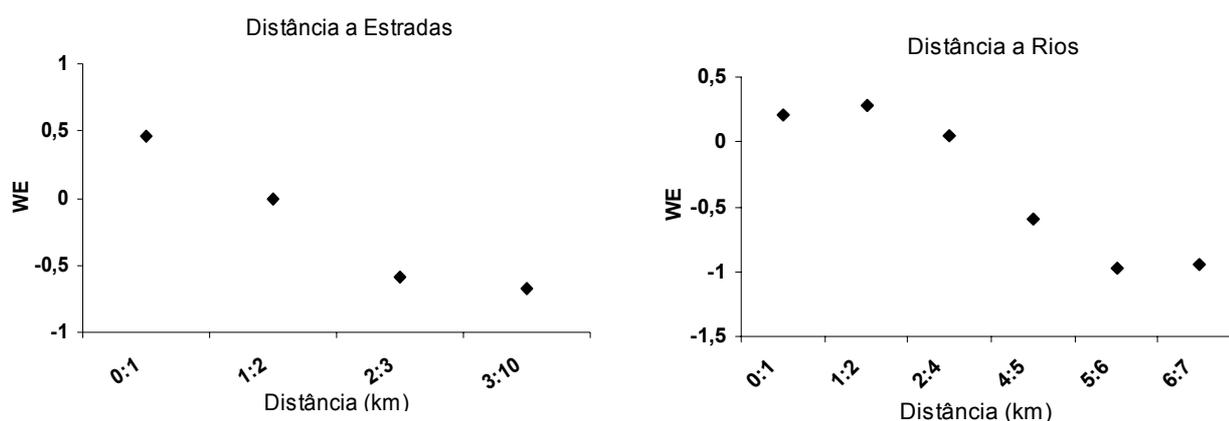


Figura 20. Efeito da distância a estradas e rios sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE) para o município de União do Sul. Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.

No caso dos rios, a tendência não foi a mesma. Perto dos rios, a probabilidade de desmatamento é maior e diminui na medida em que a distância aumenta. A dos rios foi até 7 km (Figura 20).

O efeito da distância a cidades variou e não apresentou uma tendência definida. A probabilidade do desmatamento foi maior perto das cidades, em um raio de até 4 km. A partir desta distância, o efeito apresentou pequenas oscilações até 40 km, distância até a qual a variável apresentou influência (Figura 21).

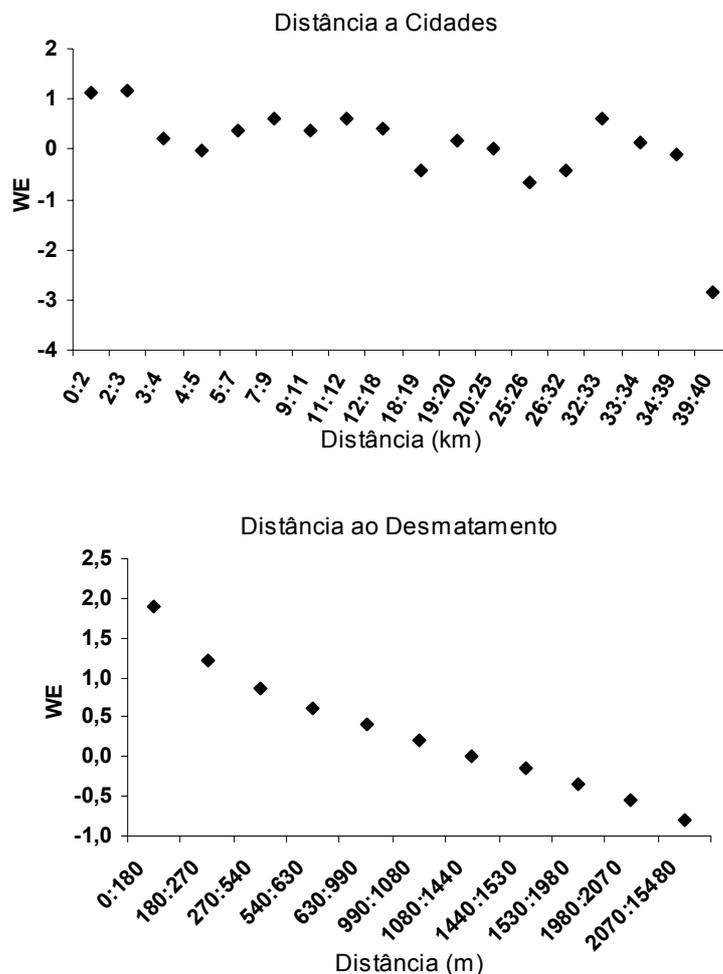


Figura 21. Efeito da distância a cidades e distância ao desmatamento sobre o desmatamento, representado pelos pesos de evidência (WE) para o município de União do Sul. Valores positivos indicam maior probabilidade de desmatamento. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.

A probabilidade de ocorrer desmatamento foi maior em áreas perto de desmatamento prévio. Esta influência foi diminuindo até os 15 km, que foi a distância até a qual foi encontrada influência (Figura 21).

Das duas classes de solo que apresenta o município, os latossolos (classe 3) tiveram uma pequena influência positiva sobre o desmatamento. As áreas com neossolos e gleissolos (classe 4) tiveram menor probabilidade de serem desmatadas (Figura 22).

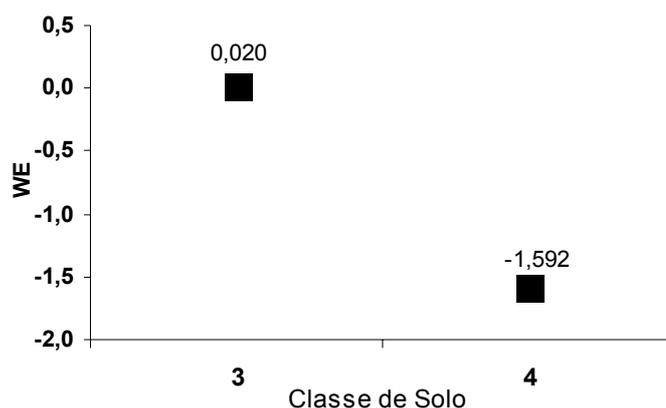


Figura 22. Efeito das classes de solo sobre o desmatamento (latossolo = classe 3 e neossolos e gleissolos = classe 4), representado pelos pesos de evidência (WE) para o município de União do Sul. Valores positivos indicam maior probabilidade de uma área ser desmatada. Valores negativos indicam menor probabilidade de desmatamento.

2.2 Validação do Modelo

Ao comparar o mapa simulado e o mapa original fornecido pelo PRODES para o ano 2004, foi obtido um índice de similitude de 0,55, o que significa que mais da metade das células que mudaram no período 2000-2004 foram simuladas acertadamente. A distribuição espacial do desmatamento dos três mapas pode ser observada na Figura23.

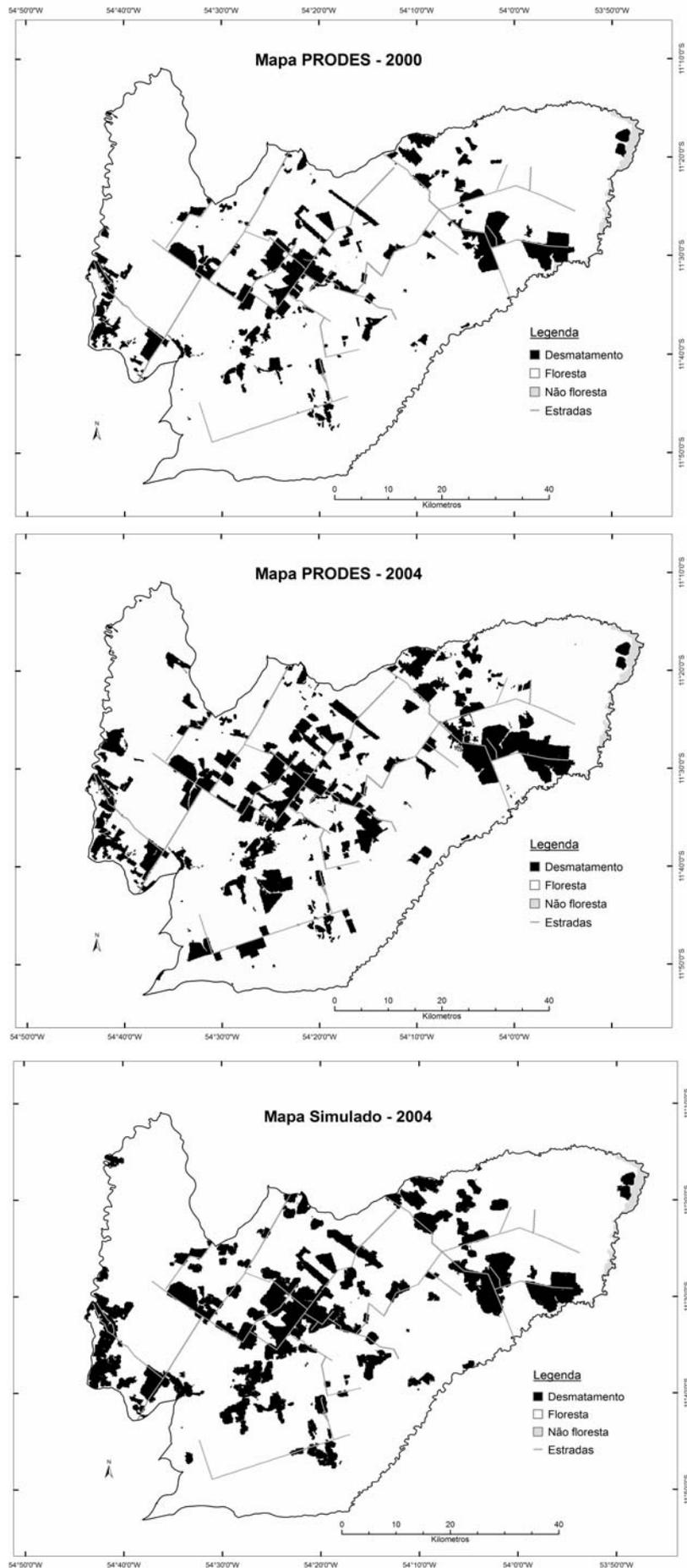


Figura 23. Mapas do PRODES 2000 e 2004 e mapa simulado para o ano 2004.

2.3 Resultados do Modelo

Uma vez calibrado o modelo, foram rodadas simulações para cada um dos três cenários para o período 2004-2025, dando como resultado 21 mapas de desmatamento para cada cenário (Figuras 24, 25 e 26).

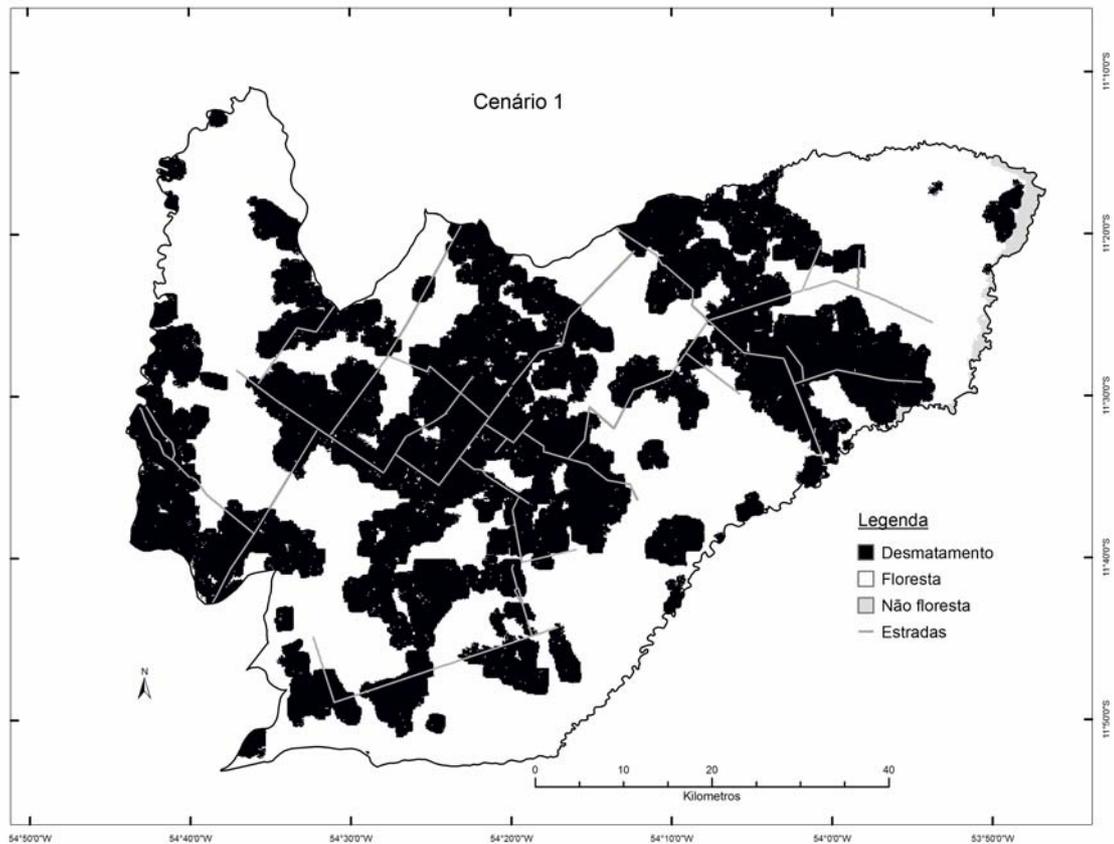


Figura 24. Mapa do Cenário 1 (tendências atuais) no ano 2025.

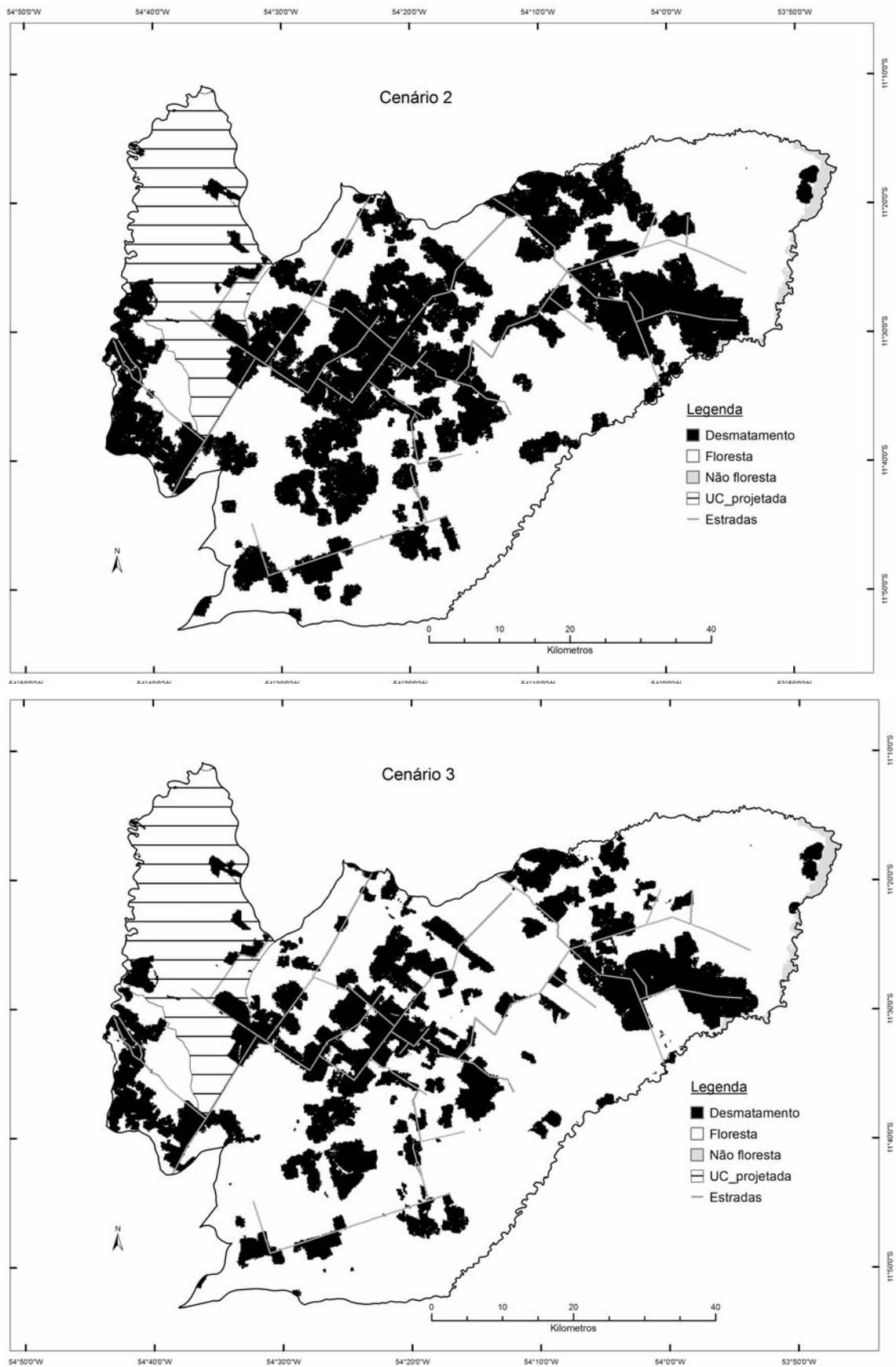


Figura 25. Mapas no ano 2025 dos Cenários 2 (cota de 80%) e 3 (cota de 50%).

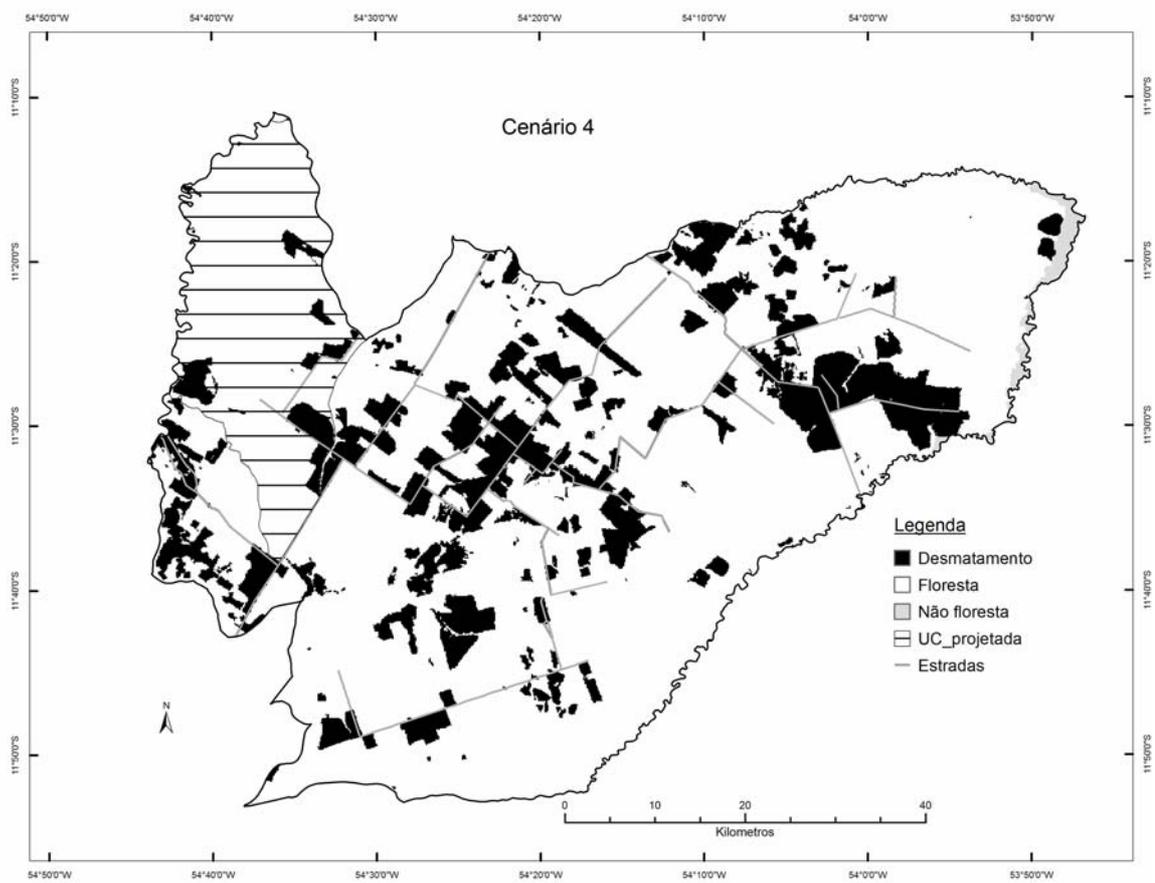


Figura 26. Mapa no ano 2025 Cenário 4 (cota de 20%).

A tendência do desmatamento (porcentagem de área desmatada) para o período 2004 – 2025, em cada cenário, está representada na Figura 27a. No ano 2004, 17% da área do município estava desmatada, este valor corresponde ao dado disponibilizado pelo PRODES. O primeiro ano simulado foi 2005.

A porcentagem de área desmatada foi maior no Cenário 1. No ano 2025, 46% da área do município está desmatada. O caso hipotético de aplicação de 80% de cota de desmatamento (Cenário 2) diminuiu a porcentagem de área desmatada no ano 2025 a 35%. A redução da cota a 50% da cota para o município de União do Sul (Cenário 3) resultou em uma diminuição da porcentagem de área desmatada com

respeito aos Cenários 1 e 2, em que 25% da área do município está desmatada em 2025. A efetiva aplicação das leis ambientais (Cenário 4) diminuiu consideravelmente a área desmatada em relação aos três cenários anteriores. Ao longo dos 21 anos, o aumento da área desmatada foi mínimo, chegando a 18% em 2025 (Figuras 29a e 29b).

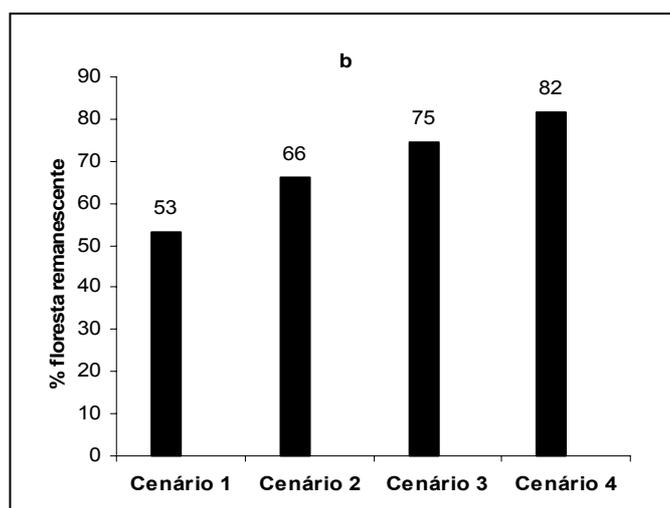
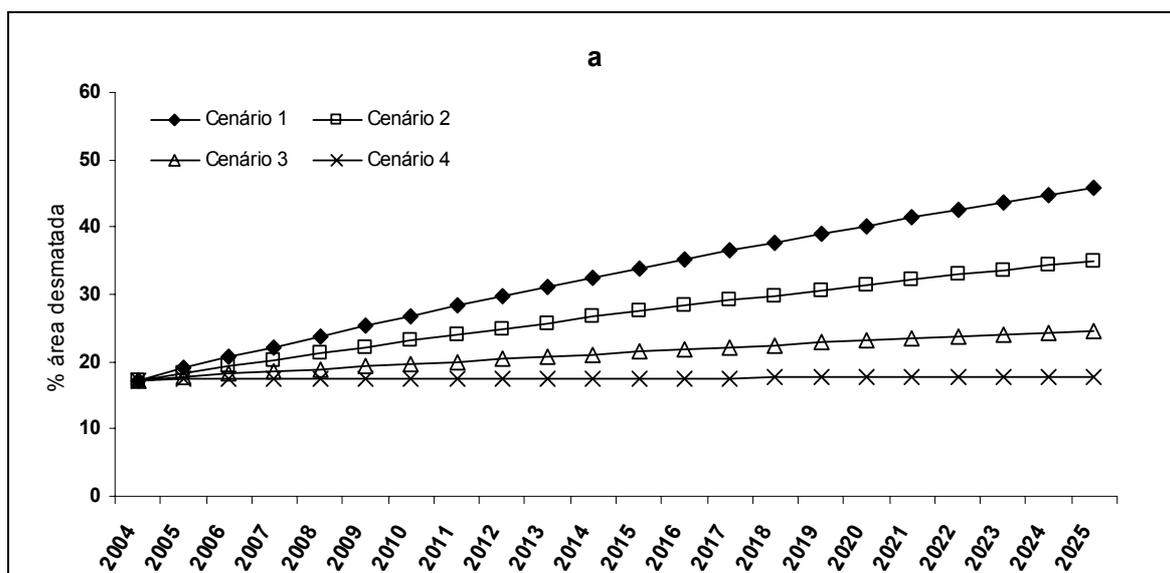


Figura 27. a) Percentagem de área desmatada do município de União do Sul nos quatro cenários para o período 2004 - 2025. **b)** Percentagem de floresta remanescente para os 4 cenários no ano 2025.

2.4 Estrutura da Paisagem

Para os quatro cenários, o número de fragmentos de desmatamento (NP) diminuiu (Figura 28a). No caso dos Cenários 1 e 2, esta tendência foi mais forte, passando de 137 e 144 fragmentos no ano 2005 a 26 e 50 em 2025. No Cenário 3, a tendência diminuiu, o número de fragmentos passou de 147 fragmentos em 2005 para 93 no ano 2025. No Cenário 4, o número de fragmentos quase não mudou, passando de 158 a 152.

A percentagem da paisagem ocupada pelo maior fragmento de desmatamento (LPI) foi similar para os quatro cenários em 2005 (3,32%). O Cenário 1 apresentou o maior incremento. A percentagem se dobrou entre 2011 e 2014, a partir daí continuou o incremento, chegando a 25% em 2025. Nos Cenários 2 e 3, a tendência foi similar, mas o incremento foi menor, chegando a 14% e 8% respectivamente em 2025. O Cenário 4 não registrou incremento; o maior fragmento continuou ocupando a mesma percentagem da paisagem no ano 2025 (Figura 28b).

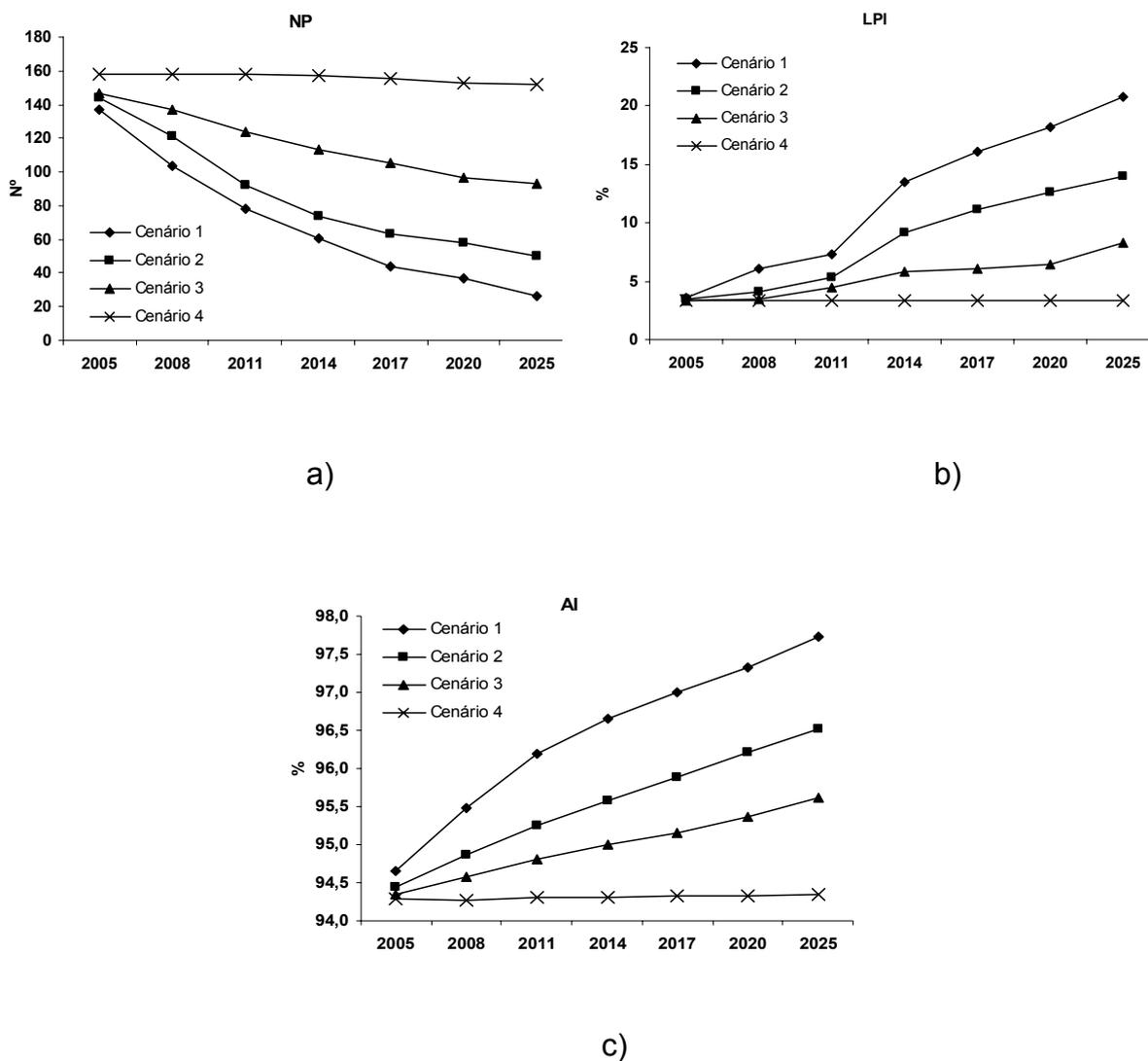


Figura 28. Medidas da estrutura da paisagem do município de União do Sul para os diferentes cenários: **a)** Número de fragmentos (NP). **b)** Porcentagem da paisagem ocupada pelo maior fragmento (LPI) de desmatamento. **c)** Agregação (AI) dos fragmentos de desmatamento.

O desmatamento nos quatro cenários ocorreu de forma agregada como foi evidenciado pelo índice de agregação (AI) (Figura 28c). No início da simulação (2005), todos os cenários apresentaram altos índices de agregação, ao redor de 94%. Estas porcentagens registraram leves aumentos até o ano 2025 nos quatro cenários, ressaltando que no caso do Cenário 1 alcançou 98%.

Os cenários representando as maiores cotas apresentaram fragmentos de desmatamento com formas mais complexas (SHAPE_AM) (Figura 29), e o índice foi aumentando ao longo do tempo. No caso do Cenário 4, a complexidade dos fragmentos foi menor, e foi registrado um leve incremento no índice ao final da simulação.

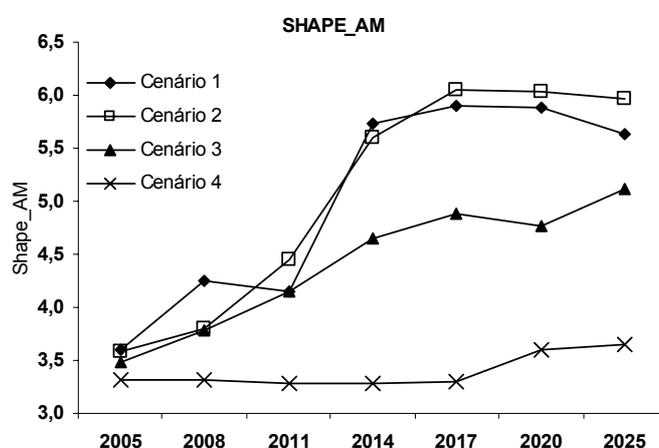


Figura 29. Medidas da estrutura da paisagem do município de União do Sul para os diferentes cenários. Media ponderada da área do índice de distribuição da forma (SHAPE_AM).

3. Discussão

Um efeito da redução na extensão da área de estudo foi a redução das variáveis proximais, como consequência da inexistência no município tanto de Unidades de Conservação como de assentamentos. A primeira assinala uma falta de uma ação por parte dos governos federal, estadual e municipal para a implantação de novas Unidades de Conservação. No caso dos assentamentos, a

inexistência destes na zona deve-se ao fato de que a colonização do município, além de recente, foi feita por médios e grandes fazendeiros, que chegaram “espontaneamente” dos Estados do sul do Brasil e de maneira independente estabeleceram as primeiras obras de infra-estrutura, como estradas e escolas (Ferreira, 2001).

As variáveis proximais usadas apresentaram o comportamento típico de áreas de colonização recente e menos degradadas (Geist & Lambin, 2001; Mertens *et al.*, 2004). As tendências foram semelhantes às encontradas com menor resolução (250 m), à exceção da distância aos rios e cidades. Não obstante, estas exercem influência até distâncias menores, e com menor intensidade que aquelas apresentadas na menor resolução espacial (250 m). É importante ressaltar a influência das distâncias a rios e cidades sobre o desmatamento.

No caso dos rios, estes ainda têm importância como vetores de desmatamento em regiões desprovidas de estradas. Dentro do município, só foi considerada a cidade de União do Sul, e o resultado mostra que esta exerce maior influência no desmatamento até maiores distâncias que no caso de algumas cidades a escala regional porque ainda possui floresta remanescente ao redor e a menores distâncias.

Os latossolos são os solos que ocupam a maior parte do município e, por isto, apresentaram uma pequena influência no desmatamento. Na realidade, o desmatamento ocorre uniformemente na paisagem do município. A estrutura destes solos e o relevo plano fazem deste município uma área de grande interesse para a expansão do agronegócio, como demonstram o rápido incremento da atividade madeireira, o cultivo da soja e a pecuária nos últimos anos (Figura 17).

O índice de similitude (0,55) obtido na validação foi levemente maior que o obtido a uma resolução menor (0,51). No entanto ao observar os mapas de distribuição espacial do desmatamento (Figura 23), pode-se notar que alguns fragmentos presentes no mapa do PRODES não aparecem no mapa simulado para 2004. Estes fragmentos correspondem a fragmentos de desmatamento de maior tamanho que ocorreram de forma repentina em 2004. Este tipo de desmatamento é típico de regiões de expansão da soja. Este tipo de desmatamento foi impossível de simular, o que dificultou a calibração. Alguns trabalhos têm ressaltado a dificuldade de simular este tipo de mudanças, além da dificuldade que apresenta a calibração de modelos, na medida em que se diminui a resolução espacial (Verburg *et al.*, 1999; Kok & Veldkamp, 2001).

No caso das simulações dos diferentes cenários, este problema foi menor porque o mapa inicial das simulações foi o mapa original de 2004 do PRODES.

A diminuição no número de variáveis proximais que afetam a área e as diferenças na intensidade e alcance da ação das variáveis usadas mostram como uma paisagem em uma escala regional altamente degradada e na qual as variáveis apresentavam um comportamento distinto (Capítulo 1), pode conter diferentes realidades onde o número e intensidade das variáveis se altere. O caso de União do Sul corresponde a uma paisagem menos degradada, mas dentro do Estado do Mato Grosso existem diferentes situações, as quais variam em número e intensidade, dependendo tanto da escala e da extensão que se use para realizar a análise. Neste sentido, ao tentar aplicar uma estratégia de controle e preservação do meio ambiente, é necessário tomar em conta estas diferenças porque o que pode

beneficiar certas zonas, pode não fornecer igual resultado no restante do Estado. Os processos e variáveis não influenciam da mesma forma, nem têm a mesma intensidade em diferentes escalas (Kok & Veldkamp, 2001).

Os cenários simulados tentaram representar uma situação hipotética, na qual foram aplicadas diferentes cotas de desmatamento dependendo da situação em que se encontrava cada município. A baixa percentagem de área desmatada que apresenta União do Sul (17%) facilitou a representação de diferentes cotas de desmatamento.

Uma continuação das tendências atuais de desmatamento levaria a uma perda de quase 50% da área de floresta do município (Cenário 1). Ela ainda acarretaria a formação de uma paisagem altamente fragmentada, na qual a paisagem apresentaria uma forte agregação do desmatamento (Figura 28c), levando ao extremo de produzir um grande fragmento que ocuparia 25% da área.

A aplicação de uma cota de 80% junto com a criação de uma Unidade de Conservação (Cenário 2), levaria a uma redução de 10% na porcentagem de área desmatada até o ano 2025. Ela resultaria em uma paisagem florestal menos fragmentada, como o indica o maior número de fragmentos de desmatamento. Ao diminuir o desmatamento, os fragmentos fusiona-se-iam menos, o que foi refletido em uma menor agregação e na diminuição da área de paisagem ocupada pelo maior fragmento (Figura 28).

A cota de 50% seria uma situação similar àquela acontecida no ano 2005, quando as taxas de desmatamento diminuíram 40% no Estado do Mato Grosso. A aplicação desta cota teria resultados semelhantes aos obtidos na escala regional, ou seja, uma diminuição pela metade da área desmatada em 2025, com respeito à

evolução das tendências atuais, e a estrutura da paisagem apresentaria menos fragmentação, como o evidenciam a redução a quase a metade dos índices da paisagem (Figura 28). Parte destas reduções são uma consequência da presença da Unidade de Conservação na parte norte de União do Sul, evidenciando a importância que esta poderia ter para o município.

O Cenário 4 representou uma situação ideal, na qual em 2025 se registraria uma importante diminuição na porcentagem de área desmatada. Para este ano, 82% da área do município estará coberta por floresta. A paisagem apresentaria mínimas variações, como se pode comprovar pela tendência quase constante dos índices de paisagem e ao observar o mapa de resultado do ano 2025 (Figuras 26 e 28).

Os fragmentos de desmatamento nos cenários apresentaram formas menos complexas na medida em que se diminuiu a cota (Figura 29). Geralmente, à medida em que aumenta o desmatamento, os fragmentos tendem a ter bordas retas (Forman, 1995). No caso das simulações, não aconteceu esta tendência, porque à medida em que o desmatamento aumenta, os fragmentos foram-se fusionando, e o desmatamento novo foi alocado para as bordas, as quais foram ficando mais complexas com o passar do tempo. Isto dificultou a simulação de bordas retas típicas das mudanças de uso da terra produzidas pela atividade humana. Este fator pode estar alterando os resultados deste índice, o que não permite ter uma idéia real da evolução da forma dos fragmentos de desmatamento no município no período simulado.

Desempenho e Limitações do Modelo

A aplicação da metodologia e conceitos do modelo DINAMICA, diminuindo-se a extensão e a escala, mostrou que o modelo é capaz de representar o desmatamento de forma razoável, como o indicou o índice de similitude. Contudo, a simulação de desmatamento que ocorre rapidamente e em fragmentos maiores, padrão observado em União do Sul, foi difícil de modelar. Este tipo de dificuldade têm sido reportada em diversos trabalhos de modelagem de desmatamento (Verburg *et al.*, 1999; Kok & Veldkamp, 2001). A aplicação do modelo para simular outros tipos de padrões de desmatamento pode resultar em simulações melhores.

Algumas limitações, independente da resolução espacial, puderam ser percebidas, a saber: mapa de uso da terra do PRODES que apresenta só uma transição, uso de uma taxa de transição fixa e o uso exclusivo de variáveis proximais para representar o desmatamento.

Para tentar melhorar o problema da taxa de transição fixa, foi usado o parâmetro “valor de saturação”. Este é apresentado como uma possível solução para uma representação um pouco mais realista da taxa (Soares-Filho *et al.*, 2002). No entanto, este parâmetro atua sobre a taxa, aumentando-a ou diminuindo-a, mas esta variação continua sendo a mesma para todos os anos, o que não é muito real. Este parâmetro foi interessante porque amplia as possibilidades de criação de cenários.

O uso do programa VENSIM é indispensável para modelar processos socioeconômicos, o qual, quando acoplado ao DINAMICA, permite a obtenção de taxas de transição mais reais e, conseqüentemente simulações mais realistas.

Como efeito da redução da área simulada, o número de variáveis proximais selecionadas foi menor; contudo, estas mostraram serem efetivas para representar o desmatamento. Não obstante, esta representação é muito simplificada, e é necessário incluir variáveis causais que permitam uma melhor representação do desmatamento no município.

4. Conclusões

O uso do modelo DINAMICA, aumentando-se a resolução espacial (de 250 m para 90 m), mostrou ser eficiente para simular o desmatamento e alguns cenários futuros para o município de União do Sul.

O desmatamento no município de União do Sul teve maior probabilidade de ocorrer nas áreas próximas a cidades, estradas, áreas desmatadas e rios. Os rios ainda têm importância como vetores de desmatamento em regiões desprovidas de estradas.

As tendências apresentadas por estas variáveis foram semelhantes àquelas encontradas em menor resolução espacial, mas elas exercem influência até distâncias menores e com menos intensidade. Estes fatores mostraram a importância de considerar as características e realidades locais na hora de tomar decisões ambientais que afetam todo o Estado.

A continuarem as tendências atuais do desmatamento, no ano 2025, o município perderá 50% de suas florestas e apresentará uma paisagem com grandes fragmentos de desmatamento ocupando boa parte do mesmo (Cenário 1).

Tanto a criação de uma nova Unidade de Conservação como a aplicação de um sistema de cotas de desmatamento, conforme a situação de cada município, mostraram bons resultados em União do Sul.

Uma cota de 80% de desmatamento diminuiria o desmatamento em 10% no ano 2025, com a conseqüente redução na fragmentação da paisagem.

A redução da cota a 50% reduziria a área desmatada a metade em 2025. A paisagem apresentaria menos fragmentação.

Na situação mais otimista, em que a cota de 20% prescrita no Código Florestal seria respeitada, a área desmatada em 2025 seria de 18%. A maior parte da área do município estaria assim coberta de floresta, apresentando pouca fragmentação.

Bibliografia

Alencar A., Nepstad D., Mcgrath D., Moutinho P., Pacheco P., Vera Diaz M. & Filho B. S. 2004. **Desmatamento na Amazônia: indo além da emergência crônica**. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, Belém, p. 85.

Alves D. S. 2002. Space time dynamics of deforestation in Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, 23:2903-2908.

Andreassian V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, 291:1-27.

Angelsen A. & Kaimowitz D. 1999. Rethinking the causes of deforestation: lessons from economic models. **The World Bank Research Observer**, 14:73-98.

Arima E., Barreto P. & Brito M. 2005. **Pecuária na Amazônia: tendências e implicações para a conservação ambiental**. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, Belém, p. 76.

Ballester M. V. R., Victoria D. D. C., Krusche A. V., Coburn R., Victoria R. L., Richey J. E., Logsdon M. G., Mayorga E. & Matricardi E. 2003. A remote sensing/GIS-based physical template to understand the biogeochemistry of the Ji-Parana river basin (Western Amazonia). **Remote Sensing of Environment**, 87:429-445.

Bruijnzeel L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 104:185-228.

Carneiro Filho A. 2005. Temos um esplêndido passado pela frente? As possíveis conseqüências do asfaltamento da BR-163. Em: Torres, M (ed) **Amazônia revelada: os descaminhos ao longo da BR-163**. CNPq, Brasília, p 185-199.

Chomitz K. M. & Gray D. A. 1996. Roads, land use, and deforestation: a spatial model applied to Belize. **World Bank Economic Review**, 10:487-512.

Collinge S. K. 1996. Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning. **Landscape and Urban Planning**, 36:59-77.

Costa M. H., Botta A. & Cardille J. A. 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, 283:206-217.

De Barros Ferraz S. F., Vettorazzi C. A., Theobald D. M. & Ballester M. V. R. 2005. Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. **Forest Ecology and Management**, 204:67-83.

Deininger K. & Minten B. 1996. Determinants of forest cover and the economics of protection: an application to Mexico. **World Bank Development Research Group**, 10:1-22.

Desjardins T., Barros E., Sarrazin M., Girardin C. & Mariotti A. 2004. Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 103:365-373.

Embrapa-Solos. 1999. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Serviço de Produção de Informação - SPI: Embrapa, Brasília, DF, p. 411.

Fearnside P. M. 1999. Cattle, deforestation and development in the Amazon: an economic, agronomic and environmental perspective. **Environmental Conservation**, 26:238-240.

Fearnside P. M. 2003. Biodiversidade nas florestas Amazônicas brasileiras: riscos, valores e conservação. Em: INPA (ed) **A floresta Amazônica nas mudanças globais**, Vol 2, Manaus, p 19-40.

Fearnside P. M. 2003. Emissões de gases de efeito estufa oriundas da mudança do uso da terra na Amazônia brasileira. Em: INPA (ed) **A floresta Amazônica nas mudanças globais**, Vol 3, Manaus, p 45-66.

Fearnside P. M. 2003. Homem e ambiente na Amazônia. Em: INPA (ed) **A floresta Amazônica nas mudanças globais**, Vol 1, Manaus, p 1-15.

Fearnside P. M. 2005. Carga Pesada: o custo ambiental de asfaltar um corredor de soja na Amazônia. Em: Torres, M (ed) **Amazônia Revelada: os descaminhos ao longo da BR-163**. CNPq, Brasília, p 496.

Ferreira De Castro F., Soares-Filho B. & Mendoza E. submetido. Modelagem de cenários de mudanças na região de Brasiléia aplicada ao zoneamento ecológico-econômico do estado do Acre. **Revista Brasileira de Cartografia**,

Ferreira J. C. V. 2001. **Mato Grosso e seus municípios**. Editora Buriti, Cuiabá, p. 660.

Ferreira L. V., Venticinqu E. & Almeida. S. 2005. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, 53:157-165.

Forman R. T. T. 1995. **Land mosaics: the ecology of landscapes and regions**. Cambridge University Press, Cambridge; New York, p. xx, 632 p.

Forman R. T. T. & Godron M. 1986. **Landscape ecology**. Wiley, New York, p. 619.

Geist H. & Lambin E. 2001. What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence., International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP). International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). **LUCC Report Series 4.**, Louvain-la-Neuve.

Geist H. J. & Lambin E. F. 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. **Bioscience**, 52:143-150.

Gustafson E. J. 1998. Minireview: quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art? **Ecosystems**, 1:156.

Hagen A. 2003. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, 17:235-249.

Herzog F., Lausch A., Muller E., Thulke H.-H., Steinhardt U. & Lehmann S. 2001. Landscape metrics for assessment of Landscape destruction and rehabilitation. **Environmental Management**, 1:91-107.

Imbernon J. & Branthomme A. 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. **International Journal of Remote Sensing**, 22:1753-1765.

Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais 2005. Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite Projeto PRODES. (INPE) (www.dpi.inpe.br/prodesdigital)

Instituto Socioambiental 2004. Mobilização para salvar nascentes do Rio Xingu. Campanha `y ikatu Xingu. ISA, <http://www.socioambiental.org/inst/camp/xingu/pgn/index.html>

Jaeger J. A. G. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. **Landscape Ecology**, 15:115-130.

Kok K. & Veldkamp A. 2001. Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 85:205-221.

Lambin E. F., Geist H. J. & Lepers E. 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**, 28:205-241.

Lambin E. F., Turner B. L., Geist H. J., Agbola S. B., Angelsen A., Bruce J. W., Coomes O. T., Dirzo R., Fischer G., Folke C., George P. S., Homewood K., Imbernon J., Leemans R., Li X. B., Moran E. F., Mortimore M., Ramakrishnan P. S., Richards J. F., Skanes H., Steffen W., Stone G. D., Svedin U., Veldkamp T. A., Vogel C. & Xu J. C. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions**, 11:261-269.

Laurance W. F., Cochrane M. A., Bergen S., Fearnside P. M., Delamonica P., Barber C., D'angelo S. & Fernandes T. 2001. The future of the Brazilian Amazon. **Science**, 291:438-439.

Laurance W. F., Vasconcelos H. L. & Lovejoy T. E. 2000. Forest loss and fragmentation in the Amazon: implications for wildlife conservation. **Oryx**, 34:39-45.

Laurance W. F. & Williamson G. B. 2001. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. **Conservation Biology**, 15:1529-1535.

Lentini M., Pereira D., Celentano D. & Pereira R. 2005. **Fatos florestais da Amazônia 2005**. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, Belém, p. 140.

Li X., He H. S., Bu R., Wen Q., Chang Y., Hu Y. & Li Y. 2005. The adequacy of different landscape metrics for various landscape patterns. **Pattern Recognition**, 38:2626.

Mamingi N., Chomitz K. M., Gray D. A. & Lambin E. 1996. Spatial patterns of deforestation in Cameroon and Zaire. **World Bank's Development Research Group**, 8:1-29.

Margulis S. 2003. **Causas do desmatamento da Amazônia brasileira**. Banco Mundial, Brasília, p. 100.

Marquesini M., Muggiati A. & Adario P. 2005. Faltou ação ao plano de ação: relatório sobre as ações de governo para combater o desmatamento na Amazônia no período março de 2004 a maio de 2005. Greenpeace, Manaus.

Matsushita B., Xu M. & Fukushima T. 2005. Characterizing the changes in landscape structure in the Lake Kasumigaura Basin, Japan using a high-quality GIS dataset. **Landscape and Urban Planning**, In Press, Corrected Proof

Mcgarigal K., Cushman S. A., Neel M. C. & Ene E. 2002. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html

Mertens B., Kaimowitz D., Puntodewo A., Vanclay J. & Mendez P. 2004. Modeling deforestation at distinct geographic scales and time periods in Santa Cruz, Bolivia. **International Regional Science Review**, 27:271-296.

Mertens B. & Lambin E. F. 2000. Land-cover-change trajectories in Southern Cameroon. **Annals of the Association of American Geographers**, 90:467-494.

Mertens B., Pocard-Chapuis R., Piketty M. G., Lacques A. E. & Venturieri A. 2002. Crossing spatial analyses and livestock economics to understand deforestation processes in the Brazilian Amazon: the case of Sao Felix do Xingu in South Para. **Agricultural Economics**, 27:269-294.

Nelson G. C. & Hellerstein D. 1997. Do roads cause deforestation? Using satellite images in econometric analysis of land use. **American Journal of Agricultural Economics**, 79:80-88.

Nepstad D., Schwartzman S., Bamberger B., Santilli M., Ray D., Schlesinger P., Lefebvre P., Alencar A., Prinz E., Fiske G. & Rolla A. 2006. Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands. **Conservation Biology**, 20:65-73.

Pedrosa B. M. & Camara G. 2002. Modelagem dinâmica e geoprocessamento. **INPE. São José dos Campos, São Paulo**:39 p.

Pfaff A. S. P. 1999. What drives deforestation in the Brazilian Amazon? Evidence from satellite and socioeconomic data. **Journal of Environmental Economics and Management**, 37:26-43.

Riitters K. H., O'Neill R. V., Hunsacker C. T., Wickham J. D., Yankee D. H., Timmins S. P., Jones K. B. & Jackson. B. L. 1995. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. **Landscape Ecology**, 10:23-29.

Roper J. & Roberts R. W. 1999. Deforestation: tropical forests in decline Forestry Issues. Forestry Advisers Network (CFAN) of the Canadian International Development Agency (CIDA)(<http://www.rcfa-cfan.org/english/index.issues.html>)

Sala O. E., Chapin F. S., Iij, Armesto J. J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Hueneke L. F., Jackson R. B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D. M., Mooney H. A., Oesterheld M. I. N., Poff N. L., Sykes M. T., Walker B. H., Walker M. & Wall D. H. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. **Science**, 287:1770-1774.

Saunders D. A., Hobbs R. J. & Margules C. R. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: A review. **Conservation Biology**, 5:18-32.

Siqueira E. M. 2002. **História de Mato Grosso: Da ancestralidade aos dias atuais**. Estrelinhas, Cuiabá, p. 272.

Soares-Filho B., Alencar A., Nepstad D., Cerqueira G., Vera Diaz M. D. C., Rivero S., Solorzano L. & Voll E. 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, 10:745-764.

Soares-Filho B. S. 1998. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. Thesis (Doctorate), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Soares-Filho B. S., Coutinho Cerqueira G. & Lopes Pennachin C. 2002. DINAMICA-a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, 154:217-235.

Soares-Filho B. S., Nepstad D. C., Curran L. M., Cerqueira G. C., Garcia R. A., Ramos C. A., Voll E., McDonald A., Lefebvre P. & Schlesinger P. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, 440:523.

Soares-Filho B. S., Nepstad D. C., Curran L., Cerqueira G. C., Garcia R. A., Ramos C. A., Voll E., McDonald A., Lefebvre P., Schlesinger P. & Mcgrath D. 2005. Cenários de desmatamento para a Amazônia. **Estudos Avançados**, 19:137-152.

Souza C., Brandão A., Anderson A. & Veríssimo A. 2005. Avanço das estradas endógenas na Amazônia. *Amazônia em Foco*. Belém, Imazon. <http://www.imazon.org.br/upload/124466.pdf>

- Turner B. L. I., D. Skole, S. Sanderson, G. Fischer, L. Fresco & Leemans R. 1995. Land-use and land-cover change; science/research plan. IGBP Report No.35, HDP Report No.7. IGBP and HDP, Stockholm and Geneva.
- Turner M. G., O'Neill R. V., Gardner R. H. & Milne B. T. 1989. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. **Landscape Ecology**, 3:153-162.
- Veldkamp A., Verburg P. H., Kok K., De Koning G. H. J., Priess J. & Bergsma A. R. 2001. The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modeling. **Environmental Modeling & Assessment**, 6:111-121.
- Verburg P. H., De Koning G. H. J., Kok K., Veldkamp A. & Bouma J. 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. **Ecological Modelling**, 116:45-61.
- Verburg P. H., Y. Chen, W. Soepboer, T. A. Veldkamp 2000. GIS-based modeling of human-environment interactions for natural resource management. In: Parks, B, Clarke KM, Crane MP, (ed) **Proceedings of the 4th international conference on integrating geographic information systems and environmental modeling: problems, prospects, and needs for research**. Boulder: University of Colorado, Cooperative Institute for Research in Environmental Science, Boulder, CO
- Vitousek P. M., Mooney H. A., Lubchenco J. & Melillo J. M. 1997. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, 277:494-499.
- Wainwright J. & Mulligan M. 2004. Modelling and model building. Em: Wainwright, J, et al. (eds) **Environmental modelling: finding simplicity in complexity**. Wiley, London, p 7-68.
- Williams M. R. & Melack J. M. 1997. Solute export from forested and partially deforested catchments in the Central Amazon. **Biogeochemistry**, 38:67-102.