



**CERRADO COM C OU COM S?**  
**MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS PARA O BIOMA**

YURI BOTELHO SALMONA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIA FLORESTAL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

## APROVAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

---

Dr. Eraldo A. Trondoli Matricardi (orientador – UnB-EFL)

---

Dr. Reuber Albuquerque Brandão (membro – UnB-EFL)

---

Dr. Mário Barroso Ramos Neto (membro - WWF)

---

Dr. Laerte Guimarães Ferreira (membro – UFG/LAPIG)

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

CERRADO COM C OU COM S?  
MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS PARA O BIOMA

YURI BOTELHO SALMONA

ORIENTADOR: ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM (197,2013)

BRASÍLIA/DF: MARÇO DE 2013

## FOLHA CATALOGRÁFICA

SALMONA, YURI BOTELHO

Cerrado com C ou com S?

Modelagem de cenários futuros para o bioma

Xvii, 87 p., 210 x297 mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade Brasília Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal)

- |                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| 1- Cerrado                 | 5. Desmatamento |
| 2- Modelagem               | 6. Futuro       |
| 3- Uso e cobertura do solo | 7. Cenários     |
| 4. Conservação             |                 |

I. EFL/FT/UnB

II- Título (série)

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Salmona, Y.B. (2013). Cerrado com C ou S? Modelagem de cenários futuros para o bioma. Dissertação de Mestrado, Publicação PPG EFL.DM 197/2013, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF, 87p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Yuri Botelho Salmona

TITULO: Cerrado com C ou S? Modelagem de cenários futuros para o bioma.

GRAU: Mestre

ANO:2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos e publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Yuri Botelho Salmona  
yuri@cerrados.org



## I- Dedicatória

Dedico ao meu “Tio Jovem”.

## II- Agradecimentos

Este trabalho não seria possível sem o apoio de meus familiares, amigos e colegas de academia. Sou muito agradecido aos meus pais, à minha companheira Daniela, que me dedicou ouvido, paciência e apoio gramatical, aos meus amigos Gabriel Daldegan, Ekena Rangel, Ana Pimenta e Camila Bastianon, assim como ao Instituto Cerrado e Sociedade – ICS. Destaco aqui o imprescindível apoio do Professor/Pesquisador Ricardo Bonfim Machado, que me auxiliou durante todo o processo, e ao preciso auxílio de Stefano Crema. E em especial, agradeço ao meu sempre presente amigo e professor, Eraldo Matricardi, a quem devo ensinamentos para além dos acadêmicos, um exemplo pleno de pessoa e pesquisador, obrigado pela orientação. Agradeço também aos membros da banca, que dedicaram seu tempo ao colaborar com esse trabalho.

### III- Resumo

O Cerrado vem sendo desmatado a taxas superiores às da Amazônia, já tendo perdido metade de sua área de vegetação nativa, principalmente para agropecuária. Tal situação levanta várias questões, entre elas: qual o futuro do Cerrado? Norteado por essa pergunta, o presente trabalho desenvolveu três cenários para as próximas cinco décadas: um de *Business as usual* (BAU), um de Intensificação do Desmatamento (ID) e um de Implementação de Políticas Conservacionistas (IPC). Todos os cenários foram elaborados a partir do uso de rede neural de multicamadas subsidiada por cadeia de Markov e pós-validado. Os resultados mostraram paisagens distintas para o ano de 2060. Enquanto o cenário BAU manteve 22,4% da vegetação nativa espalhada em pequenos fragmentos, o cenário IPC reteve a mesma área do BAU, porém com grandes fragmentos agregados ou próximos. Já para o cenário ID, não haverá nenhum fragmento de Cerrado. Independente de qual cenário mais se aproximará da realidade futura, fica evidente a eminente necessidade de implementação de melhores políticas voltadas para a gestão e conservação do bioma, a fim de proporcionar paisagens com uso inteligentes, que mantenham fragmentos de vegetação nativa promotores de serviços ecossistêmicos essenciais à vida, de maneira compatibilizada com a produção de alimentos e demais atividades humanas.

## Abstract

The Cerrado has been losing its native vegetation much faster than the Brazilian Amazon. Half of its area of natural cover has already been lost, mainly for agriculture and pasture. That situation raises many questions. One of them being how will the Cerrado survive in the future. Guided by this question, this paper developed three scenarios for the next five decades; business as usual (BAU), intensification of deforestation policy (ID), implement conservative policy (IPC). All three scenarios were made by using multi-layer neural network supplied by Markov Chain and post validation. The results show distinctive landscapes for 2060. Meanwhile BAU scenario kept 22.4% of native vegetation in small fragments, IPC scenario kept the same area, but in big fragments together or close. ID scenario shows no fragments of the Cerrado. All scenarios point to the necessity of better policies of conservation of this biome with the objective of providing intelligent landscapes, able to keep fragments of native vegetation, that promote ecosystem services, which are essential to life. It is eminent and essential to implement a better policy to administer, conserve and safeguard the biome of the Cerrado.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO .....</b>	<b>1</b>
1.1. O CERRADO .....	1
1.2. O DESMATAMENTO NO CERRADO .....	4
1.3. MODELOS DE PREDIÇÃO DE MUDANÇA DA COBERTURA DO SOLO ....	7
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>9</b>
2.1. VARIÁVEIS.....	10
2.2. REDE NEURAL.....	15
2.3. MODELO.....	19
2.4. VALIDAÇÃO .....	21
2.5. CENÁRIOS .....	23
<b>3. RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
3.1. VARIÁVEIS.....	26
3.2. MODELO.....	27
3.3. VALIDAÇÃO .....	33
3.4. CENÁRIOS .....	36
<b>4. DISCUSSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....</b>	<b>69</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE $\Phi$ DAS VARIÁVEIS TESTADAS.....	26
TABELA 2 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS TESTADAS, DESTAQUE PARA O VALOR ACIMA DE 0.6.....	27
TABELA 3 - DESEMPENHO DE MODELOS COM DIFERENTES NÚMEROS DE NÓS, COM DESTAQUE PARA O MODELO COM CINCO NÓS.....	29
TABELA 4- MATRIZ COM OS VALORES DE TRANSIÇÃO DE CLASSE DO ANO DE 2009 PARA 2010. ....	32

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – <i>BACK-PROPAGATION</i> FORMULA DE PROPAGAÇÃO DA APRENDIZAGEM DURANTE O TREINAMENTO .....	17
EQUAÇÃO 2 - DADO DE SAÍDA EM FUNÇÃO DOS NÓS DA REDE .....	17
EQUAÇÃO 3- EQUAÇÃO PARA REGRA DELTA, PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO. ....	18
EQUAÇÃO 4- EQUAÇÃO DE K PARA A FUNÇÃO <i>CROSSTAB</i> E <i>VALIDATE</i> DO IDRISI TAIGA ..	22
EQUAÇÃO 5 - EQUAÇÃO DE KNO PARA A FUNÇÃO <i>CROSSTAB</i> E <i>VALIDATE</i> DO IDRISI TAIGA .....	22

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – LIMITE DO BIOMA CERRADO (EM VERDE,) CONFORME DEFINIÇÃO DO IBGE E MMA (2004).....	2
FIGURA 2 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO MODELO EM QUESTÃO, SEM AS PROJEÇÕES .....	9
FIGURA 3 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO DESENVOLVIMENTO DOS CENÁRIOS PROJETADOS ...	10
FIGURA 4 - ALTIMETRIA E DE DECLIVIDADE .....	12
FIGURA 5 - DISTÂNCIA DE AGRICULTURA E DE PECUÁRIA .....	12
FIGURA 6 - DISTÂNCIA DE VIAS ASFALTADAS E DE VIAS DE TERRA.....	13
FIGURA 7 - DISTÂNCIA DE VIAS RODOVIÁRIAS E DE CIDADES.....	13
FIGURA 8 - DISTÂNCIA DE RIOS E FERTILIDADE DO SOLO.....	14
FIGURA 9 - PLUVIOSIDADE ACUMULADA E UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE PROTEÇÃO INTEGRAL E TERRAS INDÍGENAS.....	14
FIGURA 10 – ESQUEMA DE CAMADAS E NÓS. $I$ NO DE ENTRADA, $J$ NÓ ESCONDIDO, $K$ NÓ DE SAÍDA, $w_{IJ}$ PESO DO NÓ DE ENTRADA PARA O NÓ ESCONDIDO, $w_{JK}$ PESO DO NÓ ESCONDIDO PARA O NÓ DE SAIDA, $\theta_J$ VIÉS DA CAMADA ESCONDIDA, $\theta_K$ VIÉS DA CAMADA DE SAÍDA. ....	16
FIGURA 11 - DIAGRAMA DO MODELO DE PREDIÇÃO DE MUDANÇA DE USO DO SOLO .....	18
FIGURA 12 - MATRIZ DE MARKOV .....	19
FIGURA 13 - PAINEL DE SELEÇÃO DOS PARÂMETROS, CRITÉRIOS DE FINALIZAÇÃO DA REDE NEURAL DO LCM IDRISI TAIGA.....	20
FIGURA 14 - LIMITES PARA ANÁLISE DE VALIDAÇÃO .....	23
FIGURA 15 - ÁREAS COM RESTRIÇÕES AO DESMATAMENTO ( <i>CONSTRAINTS</i> ).....	25
FIGURA 16 - DESMATAMENTO ENTRE T1 E T2.....	28
FIGURA 17 - CONCENTRAÇÃO DE DESMATAMENTO ENTRE 2002 E 2008 .....	29

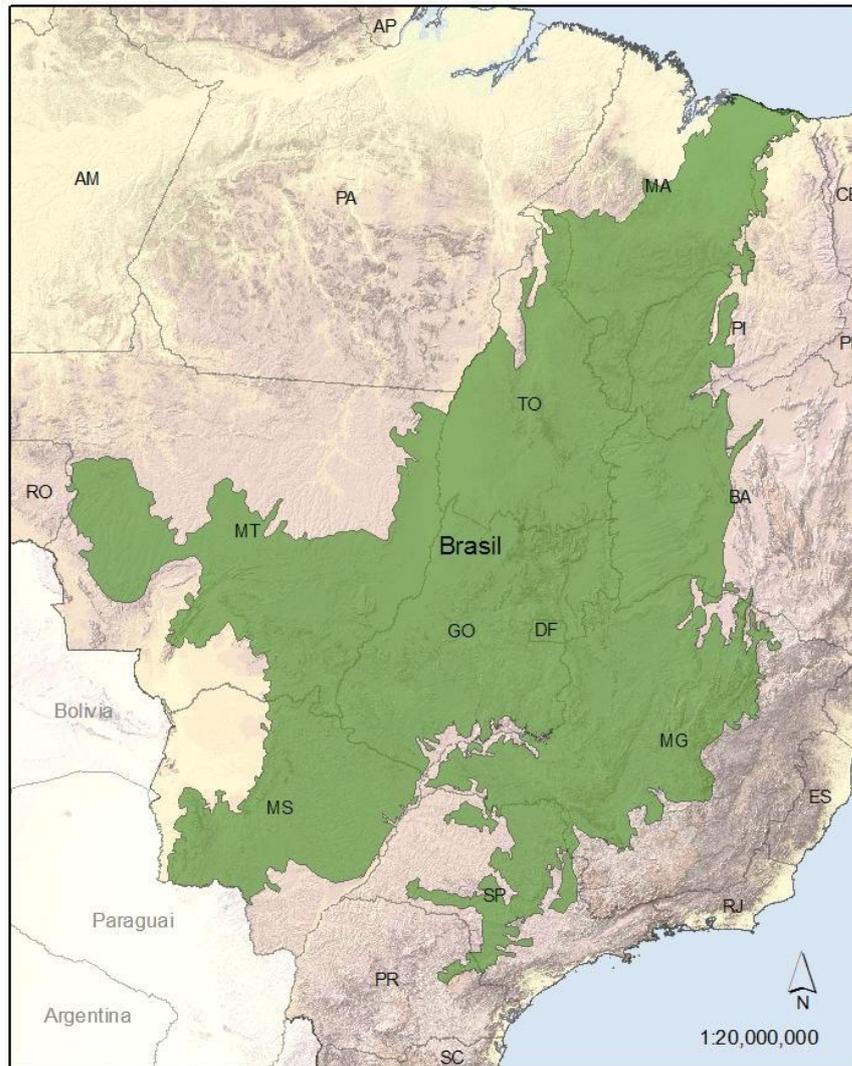
FIGURA 18 - PAINEL <i>RUN TRANSITION SUB-MODEL</i> COM A TAXA DE ACURÁCIA FINAL .....	30
FIGURA 19 - POTENCIAL DE TRANSIÇÃO DE CERRADO PARA DESMATADO DE 2009 PARA 2010 .....	31
FIGURA 20 - COMPARATIVO DE N(M) DO MODELO PROPRIAMENTE DITO E DO NULO.....	33
FIGURA 21- M(M) RESULTADO POR BACIAS, COMPARANDO MODELO NULO COM MODELO PROPRIAMENTE DITO .....	34
FIGURA 22 - COMPARATIVO DE P(M) DO MODELO PROPRIAMENTE DITO COM O NULO.....	35
FIGURA 23 - ÍNDICE KAPPA NAS REGIÕES HIDROGRÁFICAS .....	35
FIGURA 24 - BAU 2020.....	36
FIGURA 25 - BAU 2030.....	37
FIGURA 26 - BAU 2040.....	38
FIGURA 27 - BAU 2050.....	39
FIGURA 28 - BAU 2060.....	40
FIGURA 29 - ID 2020.....	41
FIGURA 30 - ID 2030.....	42
FIGURA 31 - ID 2040.....	43
FIGURA 32 - ID 2050.....	44
FIGURA 33 - ID 2060.....	45
FIGURA 34 - IPC 2020.....	46
FIGURA 35 - IPC 2030.....	47
FIGURA 36 - IPC 2040.....	48
FIGURA 37 - IPC 2050.....	49
FIGURA 38 - IPC 2060.....	50
FIGURA 39 - PROJEÇÃO DA PROPORÇÃO DE CERRADO PARA OS TRÊS CENÁRIOS.....	51
FIGURA 40 - NÚMERO DE FRAGMENTOS DE CERRADO .....	52
FIGURA 41 - DESVIO PADRÃO DO TAMANHO DOS FRAGMENTOS REMANESCENTES.....	53
FIGURA 42 - TAMANHO MÉDIO DOS FRAGMENTOS REMANESCENTES .....	54
FIGURA 43 - PORCENTAGEM DE CERRADO NAS REGIÕES HIDROGRÁFICAS AMAZÔNICAS E PARAGUAIA.....	55
FIGURA 44 - PORCENTAGEM DE CERRADO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA TOCANTINS .....	56
FIGURA 45 - PORCENTAGEM DE CERRADO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA ARAGUAIA.....	56
FIGURA 46 - PORCENTAGEM DE CERRADO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA SÃO FRANCISCO E ATLÂNTICO LESTE.....	57
FIGURA 47 - PORCENTAGEM DE CERRADO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA PARANÁ.....	58
FIGURA 48 - ATLÂNTICO NORDESTE OCIDENTAL E PARNAÍBA.....	59

# **1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO**

## **1.1. O CERRADO**

Cerrado é o termo habitualmente utilizado para designar o mosaico de ecossistemas savânicos e campestres, além de intrusões florestais, que ocorrem no Brasil Central (EITEN, 1971). Trata-se de um complexo vegetacional que possui relações ecológicas e fisionômicas com outras savanas da América tropical, do continente africano e da Austrália (EITEN, 1972)

Originalmente, o Cerrado ocupava cerca de 24% do Brasil, ocorrendo em 11 estados, desde o litoral maranhense até noroeste do Paraná, passando pelo Planalto Central (IBGE & MMA, 2004), chegando a ocorrer em pequenas porções no Paraguai e Bolívia (MMA, 2007), além de áreas descontínuas no norte do Brasil. Segue na próxima página (Figura1) o limite do bioma definido pelo IBGE/MMA em 2004.



**Figura 1 – Limite do bioma Cerrado (em verde,) conforme definição do IBGE e MMA (2004).**

O clima na região do Cerrado é definido como tropical chuvoso (Aw), segundo a classificação de Köppen, com precipitação média próxima aos 1500mm, podendo variar de 750mm a 2000mm anuais (ADÁMOLI ET AL, 1987). Apresenta duas estações bem definidas: uma seca, de abril a setembro, e uma chuvosa, de outubro a março, com variações regionais.

As formações de relevo predominantes no Cerrado são residuais de superfícies de aplainamento, conhecidas como Chapadas, formadas predominantemente pelo processo de pediplanação (AB'SABER, 1960), as quais apresentam topografia plana a levemente onduladas já bastante intemperizadas, com cobertura laterítica, pisolítica e de latossolos (PINTO, 1993). Em torno das chapadas encontram-se as áreas serranas, depressões periféricas e interplanálticas resultantes de processos de pediplanação, além de vales fluviais resultantes da dissecação e pedimentação ao longo do tempo (PINTO, 1993). O

relevo do Cerrado varia desde a altitude de 300m, ( Baixada Cuiabana – MT), até mais de 1600m, na Chapada dos Veadeiros – GO, (MMA, 2007).

Os solos do Cerrado são bastante antigos e intemperizados, graças às chuvas que, ao longo do tempo geológico, deixaram-no ácido por causa do acúmulo de óxido de alumínio e pobre em nutrientes ocasionada pela lixiviação de parte dos nutrientes. Os solos são geralmente bem drenados e profundos (HARIDASAN, 1982). No Cerrado predominam os latossolos (46,6% do bioma) (ADÁMOLI ET AL, 1986), tanto em áreas sedimentares quanto em terrenos cristalinos (AB´SABER, 1983).

A flora do Cerrado é característica e diferenciada dos biomas vizinhos, com predomínio das formações savânicas, embora muitas fitofisionomias compartilhem espécies com outros biomas (HERINGER, BARROSO, *et al.*, 1977). A origem das formações savânicas do Cerrado é muito discutida (COUTINHO, 1978). Existem diferentes teorias, nem sempre concordantes. De maneira geral, pode-se atribuir a vegetação savânica do Cerrado à depauperização do solo pela chuva, ou seja, resultado indireto do clima que o levou a um clímax edáfico (EITEN, 1994).

Atualmente o Cerrado é reconhecido como um importante bioma a ser conservado e estudado. O grande número de endemismos e alto grau de antropização lhe conferiram o status de *Hotspot* da biodiversidade (MYERS, MITTERMEIER, *et al.*, 2000). Dentre todas as savanas, o Cerrado tem a maior biodiversidade, com cerca de 5% da biodiversidade do planeta (ALHO e MARTINS, 1995), são mais de 12 mil espécies de plantas (MENDONÇA ET AL, 2008), sendo 44% endêmicas (KLINK e MACHADO, 2005), mais de 90 mil de insetos (AGUIAR, MACHADO e MARINHO FILHO, 2004), 1200 de peixes, 837 aves, 202 répteis, 150 espécies de anfíbios (LEWINSOHN, 2006), 199 mamíferos (MARINHO-FILHO ET AL, 2002), além disso, estima-se que haja mais 90.000 espécies de invertebrados (DIAS, 1992).

Além da rica biodiversidade, o Cerrado desempenha papel fundamental na distribuição da água pelo país, contribuindo com seis das oito grandes bacias brasileiras, com 94% da produção hídrica da bacia do São Francisco, 71% da Araguaia/Tocantins e 71% da do Paraná/Paraguai (LIMA e SILVA, 2008).

Apesar dos vários serviços ecossistêmicos prestados pelo bioma, até o ano de 2010 restavam apenas 50,8% da cobertura vegetal original (CSR/IBAMA, 2011b).

## 1.2. O DESMATAMENTO NO CERRADO

A trajetória de ocupação do Cerrado é antiga e permeada por intervenções alinhadas com diferentes entendimentos das potencialidades de seus recursos, que variaram de acordo com o ciclo econômico hegemônico.

Há registros fósseis da ocupação humana na região do Cerrado com cerca de 11.500 anos, em Lagoa Santa, Minas Gerais, advindos das expedições Lund (ISPN, 2012). Entretanto há registros de homínídeos com mais de 31.500 anos em São Raimundo Nonato, Piauí, a menos de 50 quilômetros dos limites do que hoje chamamos de bioma Cerrado, o que nos leva a assegurar a ocupação da região no início do período Holoceno (SHMITZ, 1993).

A ocupação nesse período se deve preponderante ao recuo da glaciação e, com ela, a regressão dos ventos úmidos e a diminuição da corrente fria de *Falkland*, que permitiu o avanço de correntes quentes pelo litoral e parte do interior do continente, ou seja, a tropicalização do ambiente (AB'SABER, 1977a). Nesse período houve melhores condições para migrações, avançando pelo interior. Em sua maioria, a tradição que se destaca pela ocupação desse período (até 8500 a.p) é a Itaparica, que avançou por Pernambuco, Piauí, Bahia, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e parte de São Paulo (SHMITZ, 1993). Essa ocupação causou, no entanto, insignificantes impactos ambientais, padrão que praticamente se manteve com as populações indígenas até o período da colonização portuguesa.

Os efeitos ambientais da colonização foram percebidos rapidamente, mas só alcançaram o interior de maneira mais evidente no ciclo do ouro, com os Bandeirantes, em meados de 1720, perpassando as regiões que hoje conhecemos como Centro Oeste e Bahia (GANEM, DRUMMOND e FRANCO, 2008).

Nos dois séculos seguintes, com a exaustão do ouro, a principal atividade no interior passou a ser a pecuária. Foi quando o Estado (tanto o Império quanto a República) intensificou os investimentos em infraestrutura para promover a colonização do interior; isso se deu principalmente através de ferrovias, como Estrada de Ferro Oeste de Minas (1870), Belo Horizonte – Sete Lagoas (1895), Estrada de Ferro Goiás (1920), Linha Roosevelt em São Paulo (1934) e demais ampliações da Estrada de Ferro Central do Brasil.

Nos anos subsequentes, o Centro-Oeste, especialmente Goiás, cresceu economicamente por se especializar na produção de bens primários para a então pujante cultura cafeeira e incipiente indústria de São Paulo e Minas. Começava a se formar o imaginário do Cerrado como território de vocação agropecuária.

Durante os anos que seguiram o pós II Guerra, as relações entre as nações se intensificaram e com elas uma nova Divisão Internacional do Trabalho. Países como o Brasil, subdesenvolvidos, com características ambientais favoráveis à agricultura, mas extremamente dependentes de capital, ciência e tecnologia, foram incorporados como grandes laboratórios para a então chamada Revolução Verde (GOMES, 2008). Nesse contexto o Cerrado, com suas vastas planícies, boas condições climáticas, solos de fácil correção e mão de obra barata, surgiu como uma nova fronteira agrícola a ser explorada (CHAVEIRO e BARREIRA, 2010). Nessa lógica, Getúlio Vargas criou a marcha para o Oeste (GANEM, DRUMMOND e FRANCO, 2008).

Até então, o imaginário sobre o Cerrado era negativo, de sertão, algo sem valor, algo a ser domado, de povo rústico e selvagem. Essa imagem foi inicialmente alimentada pelos naturalistas europeus, especialmente Auguste de Saint'Hilarie (CHAVEIRO e BARREIRA, 2010).

Na década de 1960, com a criação da Brasília, vieram incentivos estruturantes à ocupação do Cerrado, com a SUDECO – Superintendência do Desenvolvimento do Centro-Oeste (1967), o Plano de Integração Nacional (1970) e o Prodoeste– Programa de Integração do Centro Oeste (1971), trazendo a mecanização e tecnificação dos processos produtivos do campo, dos insumos e créditos agrícolas; com a ACAR – Associação de Crédito e Assistência Rural (1948) vieram incentivos científicos e de informação; com o IPEA – Instituto de Pesquisa Agrícola (1960) e a Embrapa (1973), tecnologia e assistência agrícola; e desde 2007 o PAC – Programa de Aceleração do Crescimento, com diversas obras de ampliação da rede logística, principalmente para o escoamento da produção agropecuária (CHAVEIRO & BARREIRA, 2010, GANEM, DRUMMOND, & FRANCO, 2008). Nesse contexto a população na região do Cerrado aumentou 6,5 vezes entre 1950 e 1960 (SARMIENTO e PINILLOS, 2006).

Essa estrutura institucional e física sustentou e sustenta a atividade pecuária e agrícola no Cerrado. O objetivo percípua da maior parte da atividade pecuária no Cerrado

é exportar (WEHRMANN, 1999). Entretanto, a ocupação do Cerrado pelas atividades agropecuárias não se deu de uma única maneira e pode ser diferenciada por “Frentes”, tais como: as Frentes de subsistência, ocorrendo tipicamente nas áreas ocupadas há mais tempo, onde há solos mais férteis, associadas a mercados locais; Frentes de pecuária bovina tradicional e extensiva, em sua maioria com baixo uso de insumos e manejo, cuja característica marcante é a consolidação de áreas como reserva de valor em épocas de instabilidade macroeconômica (MARTHA ET AL, 2007b); Frentes de agricultura comercial moderna, que crescem apoiadas no desenvolvimento de infraestrutura de transporte e de tecnologias de manejo; e Frentes especulativas, usualmente associadas a grandes operadores, que inicialmente ocupam pequenas áreas para posteriormente vender (MUELLER e MARTHA, 2008). Cabe salientar que essas frentes podem ora se sobrepor e ora se suceder no tempo.

Segundo a Pesquisa Pecuária Municipal – PPM – do IBGE, a expansão da fronteira agropecuária, seja ela da Frente que for, está longe de ser encerrada; a demanda por *commodities* e demais produtos do agronegócio só tem aumentado (MUELLER e MARTHA, 2008). De 1996 a 2005, o rebanho bovino cresceu 2,5% ao ano no Cerrado, com destaque para os estados do Mato Grosso, Pará e Tocantins, com adensamento médio de 1,1 boi por ha; enquanto as áreas de lavoura cresceram 10,1% nos mesmos período e região.

Esses avanços da fronteira agropecuária são o elemento majoritário nas taxas de desmatamento do Cerrado. Entre 1970 e 1975, a taxa de desmatamento anual do Cerrado era estimada em 2,00% (KLINK e MOREIRA, 2002), entre 1976 a 1996, era cerca de 1,25% (MUELLER e MARTHA, 2008). Entre 1993 e 2002 estimava-se em 0,67% (GANEM, DRUMMOND e FRANCO, 2008), de 2002 a 2008, em 0,70% (CSR/IBAMA, 2011a), de 2008 a 2009 era de 0,37% (CSR/IBAMA, 2011a), e de 2009 a 2010 foi de 0,32% (CSR/IBAMA, 2011b)<sup>1</sup>. Assim, foram desmatados mais de um milhão de quilômetros quadrados do Cerrado. Até 2010, o Cerrado tinha 50,84% de sua vegetação nativa (CSR/IBAMA, 2011b).

---

<sup>1</sup> Apenas os dados a partir de 2002 dizem respeito ao limite do bioma Cerrado tal qual (IBGE & MMA, 2004), com área total de 2,039,386,890 hectares. Cabe salientar que há outras estimativas para o período a partir de 2002, tais como do Lapig - Laboratório de processamento de imagem e Geoprocessamento e Conservação Internacional.

A perda de vegetação nativa tem diversos impactos ambientais, em diversas simulações levando em consideração a teoria da percolação em paisagens florestais (WITH e KING, 1997) com menos de 59,28% de vegetação nativa apresentaram uma acentuada perda de biodiversidade, pela alta fragmentação da paisagem e consequente perda de habitat viáveis. O Cerrado como um todo já passou esse limiar, sendo que a região sul do Cerrado está praticamente toda antropizada. O mesmo aconteceu com o norte do estado de São Paulo; sul e nordeste goiano; região de Dourados, no Mato Grosso do Sul; entorno das BR-163, BR- 363, BR-070, BR-158 e BR-251 no Mato Grosso e Oeste baiano. Porém ainda restam áreas com grandes fragmentos de Cerrado, em geral no norte, como por exemplo, a região inundável do Araguaia e todo o leste do Tocantins, com destaque para o Jalapão e arredores; em Minas Gerais, na Serra do Espinhaço, Serra da Canastra e próximo a Januária; além das áreas mais baixas no chapadão do oeste baiano.

### **1.3. MODELOS DE PREDIÇÃO DE MUDANÇA DA COBERTURA DO SOLO**

Tendo em vista a acelerada dinâmica de mudança de uso do solo do Cerrado é imprescindível o planejamento territorial que garanta a preservação dos recursos naturais aliada à qualidade de vida das populações envolvidas. Em diversas outras regiões, a preocupação com as tendências de mudança de uso do solo levaram pesquisadores a utilizar ferramentas capazes de modelar cenários futuros. Como exemplos podem ser citados o caso da cidade de Dhaka em Bangladesh (ISLAM e AHMED, 2011), Kathmandu, Nepal (THAPA e MURAYAMA, 2012), região central do Chile (SCHULZ, CAYUELA, *et al.*, 2010), Colômbia (GONZALEZ, ETTER, *et al.*, 2011), Catamayo-Chira, entre o Equador e o Peru (VALDIVIESO e SENDRA, 2010), Piracicaba, Brasil (ALMEIDA, GLEIRIANI, *et al.*, 2008).

O Cerrado também já foi alvo de estudos de modelagem de predição de mudança do uso e cobertura do solo. Em 2012, pesquisadores brasileiros usando o programa Dinâmica –EGO (SOARES-FILHO, RODRIGUES e COSTA, 2009) geraram cenário da paisagem do Cerrado para o ano de 2050 (FERREIRA, FERREIRA JR., *et al.*, 2012).

Com o aperfeiçoamento dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG), os modelos de predição de mudanças de uso e cobertura do solo, especialmente os espacialmente explícitos, se tornaram importantes técnicas para auxiliar o planejamento de caminhos possíveis para o futuro, facilitando um melhor conhecimento dos processos de mudança de uso e cobertura do solo e seus vetores (VELDKAMP e LAMBIN, 2001;

DENG ET AL, 2008). Contudo, a mudança de uso do solo é um processo dinâmico, não linear e altamente complexo (VERBURG, SOEPBOER, *et al.*, 2002). As variáveis envolvidas, por sua vez, também são muito complexas, especialmente considerando que elas são ambientais e antropogênicas e podem provocar efeitos em diferentes escalas (LAMBIN ET AL, 2001).

Em geral, um cenário de mudanças de uso do solo de um período futuro ( $t'$ ) pode ser projetado tendo como base a análise de mudança de uso do solo ocorrida entre dois períodos conhecidos ( $t_1$  e  $t_2$ ) da mesma área, conjuntamente com variáveis correlacionadas (VALDIVIESO e SENDRA, 2010). Portanto, com base em técnicas de modelagem de predição de mudança do uso do solo, o presente estudo objetivou gerar três diferentes cenários futuros para o Cerrado, sendo um de *Business as usual* (BAU), um de Intensificação do Desmatamento (ID) e um de Implementação de Políticas Conservacionistas (IPC). Os três cenários foram projetados para diferentes períodos (2020, 2030, 2040, 2050, 2060), a fim de identificar tendências espaciais dos diferentes casos propostos.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Um modelo é uma abstração de um processo que busca elaborar hipóteses e predições sobre um dado sistema (HAGGETT e CHORLEY, 1967). No caso em questão, o processo é o desmatamento no Cerrado. O presente modelo (algoritmo) tem como dados de entrada um conjunto de variáveis espaciais relacionadas à mudança de uso do solo e mapeamentos de uso do solo de diferentes períodos que alimentam um sistema de rede neural (de percepção de multicamadas) conjugado a uma Cadeia de Markov para identificar quando, onde e quanto ocorrerá desmatamento (predição).

O sistema de modelagem de predição de mudança do uso do solo utilizado no trabalho foi o *Land Change Model* (LCM) do programa IDRISI Taiga da Clark University (EASTMAN, 2009). De forma simplificada, o sistema segue a seguinte lógica: dois mapas de uso do solo de uma mesma área, de períodos distintos ( $t_1$  e  $t_2$ ), são analisados quanto à mudança do uso do solo e um conjunto de variáveis são analisadas quanto à sua relação com a mudança detectada. Os dados subsidiam uma rede neural que identifica os padrões de mudança, a partir da qual se elabora um mapa de probabilidade de mudança, que recebe delimitações sobre a proporção da mudança de acordo com uma cadeia de Markov e com isso projeta um cenário ( $t_3^{\text{modelado}}$ ) para uma data da qual se tem um mapa de uso real ( $t_3$ ). A comparação entre esses mapas permite a validação do modelo conforme fluxograma abaixo (figura 2).

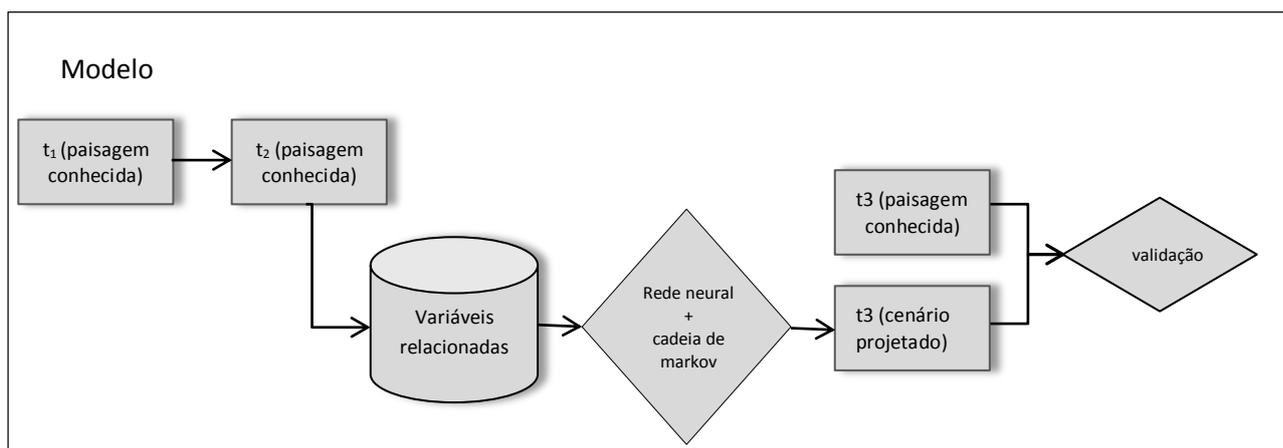


Figura 2 - Esquema simplificado do modelo em questão, sem as projeções

Após a validação do modelo, foram executadas projeções para os períodos desejados (figura 3), assim como os cenários submetidos a critérios específicos de

mudança do uso do solo, como é caso do cenário ID e IPC (que serão abordados mais à frente).

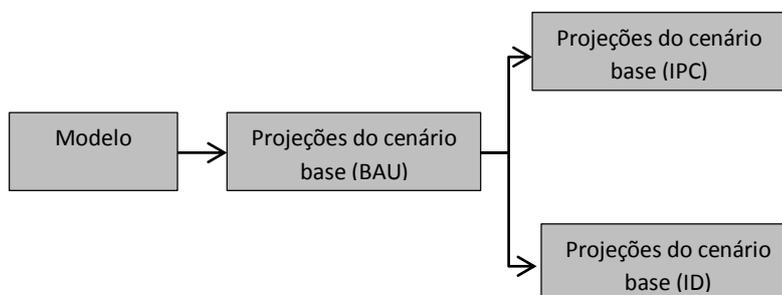


Figura 3 - Esquema simplificado do desenvolvimento dos cenários projetados

## 2.1. VARIÁVEIS

Os dados de cobertura do solo que representam as paisagens de períodos conhecidos utilizados no trabalho foram os produzidos pela Secretaria de Biodiversidade e Floresta do Ministério do Meio Ambiente – SBF/MMA, por meio do Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) do IBAMA. Esse mapeamento realizado pelo CSR teve como base os dados produzidos pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Biodiversidade – PROBIO – que buscou identificar nas imagens de satélites (ambas *Landsat 5 TM*) padrões de antropismo para além dos limites já mapeados pelo PROBIO como antropizados (desmatados). As novas áreas convertidas foram, então, digitalizadas por intérpretes. O produto final foi gerado na escala de 1:250.000 e não apresentou a tipologia do antropismo (CSR/IBAMA, 2009). O CSR produziu dados espaciais de uso do solo para os anos de 2002 (ajuste dos dados do PROBIO), 2008, 2009 e 2010. Foram utilizados como  $t^1$ ,  $t^2$  e  $t^3$  do modelo, respectivamente, os anos 2002, 2009 e 2010.

Um pré-requisito importante para o sucesso de um modelo de predição de mudança de uso do solo tal qual o proposto é a seleção das variáveis adequadas, representadas na escala apropriada (VELDKAMP e LAMBIN, 2001). Para tanto, foi realizada uma compilação de diversos dados espaciais disponíveis e assumidamente relacionados ao desmatamento no Cerrado. Diversas camadas de informação foram reunidas em um banco de dados espaciais, inicialmente no formato do programa Arcgis 9.3 (ESRI, 2006). Os dados inicialmente selecionados foram: pluviosidade anual acumulada (CAMARON,

HIJMANS, *et al.*, 2005), solos, altimetria (USGS, 2010), declividade (produzida com base na altimetria) Unidades de Conservação (MMA, 2012), Terras Indígenas (FUNAI, 2012), Terrenos sujeitos a inundação (IBGE, 1980), rodovias (DNIT, 2012), localidades urbanas (IBGE, 2003), fertilidade do solo (IBGE, 1980).

As variáveis ambientais, tais como, pluviosidade, solos, altimetria e terrenos inundáveis foram inicialmente selecionadas por ser esperável que os agentes de mudança do uso do solo, em especial os agropecuaristas, tenham predileção por áreas mais aptas às suas atividades. A princípio, áreas com alta pluviosidade, planas, com solos férteis e não alagáveis.

Já as variáveis advindas de intervenções humanas, tais como, Unidades de Conservação, Terras Indígenas, rodovias e localidades urbanas também podem influenciar a tomada de decisão de mudança do uso do solo, no caso de desmatar. Sendo esperável a preferência por desmatar fora de Unidades de Conservação e Terras Indígenas, próximo a rodovias (a fim de facilitar o escoamento da produção), nas imediações de cidades (por serem possivelmente polos comerciais).

Todas essas variáveis foram ajustadas de maneira a terem os mesmos critérios espaciais e formatação, definida da seguinte maneira: formato *raster*, extensão *.rst* (padrão do programa Idrisi), tamanho de pixel igual a 0,5km, mesmo número de linhas e colunas, mesmo retângulo envolvente, projeção Policônica, mesmo Datum (SIRGAS2000), unidade de medida linear em quilômetros, unidade de medida angular em graus, meridiano central - 54°. Esse passo é condição para que os dados sirvam de *input* no *Land Change Model* - LCM (EASTMAN, 2009).

Outro procedimento de adequação ao *Land Change Model* foi o reescalonamento dos valores das variáveis, a fim de deixar os valores dentro de uma distribuição mais próxima uma da outra. Esse procedimento foi realizado pelas ferramentas *Variable Transformation Utility* e *Image calculator*, ambas do IDRISI.

Parte desses dados foi utilizada no modelo apenas após os ajustes espaciais e de formatação, tais como pluviosidade anual acumulada, solos, terrenos sujeitos a inundação e altimetria. Para que outros dados fossem inseridos no modelo, foi necessário gerar (no próprio IDRISI, ferramenta *Distance*) superfícies de distância. Esse foi o caso das

Unidades de Conservação e Terras Indígenas, rodovias e localidades urbanas (Figuras 4 a 9).

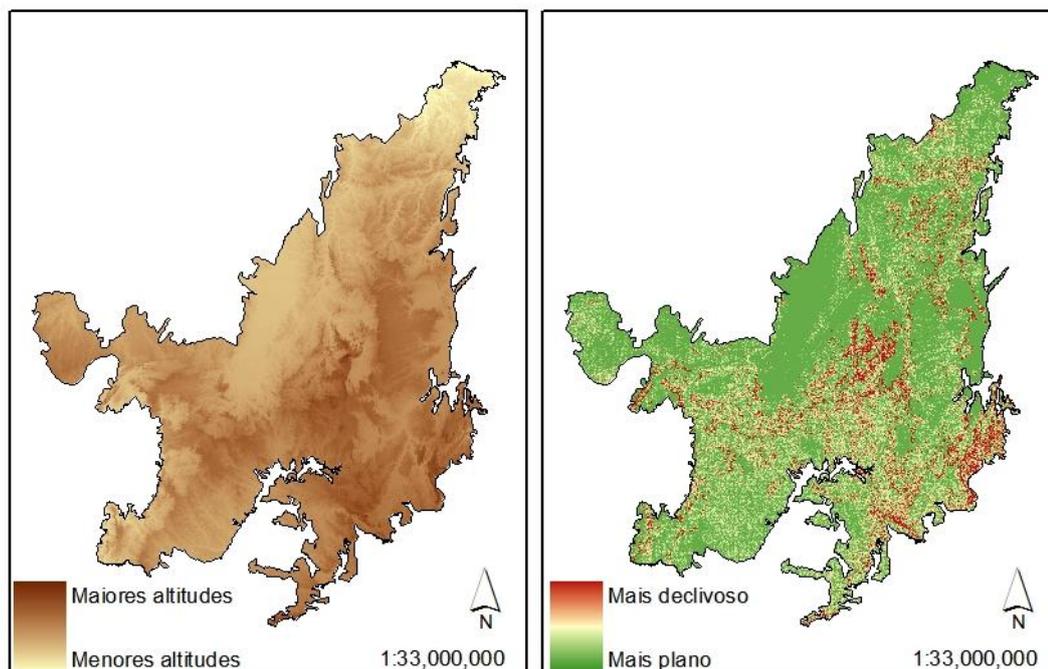


Figura 4 - Altimetria e de Declividade

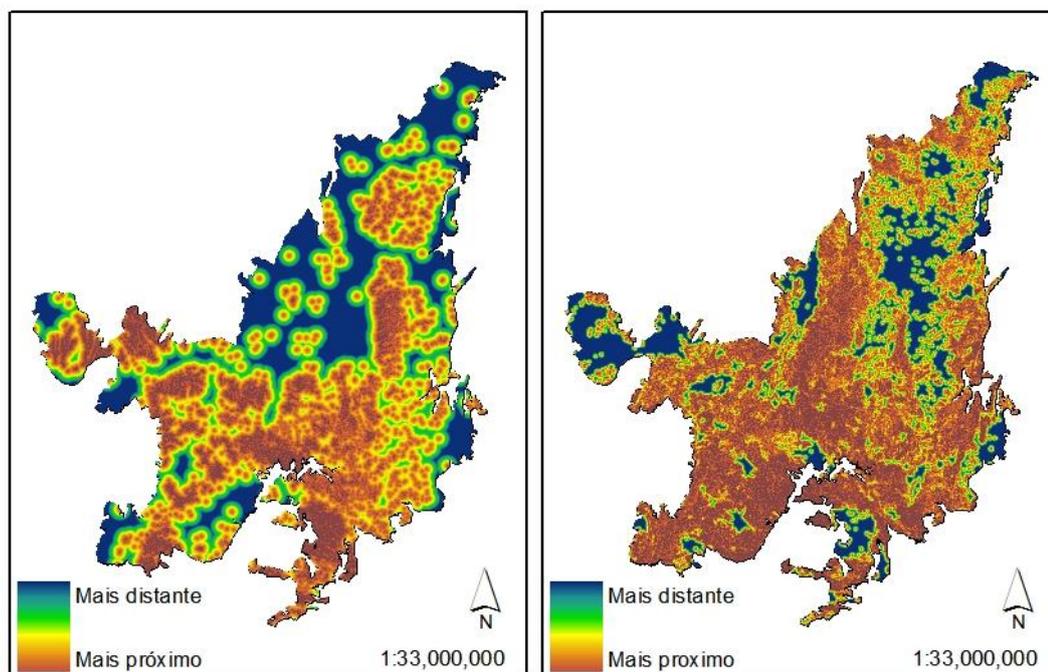


Figura 5 - Distância de Agricultura e de Pecuária

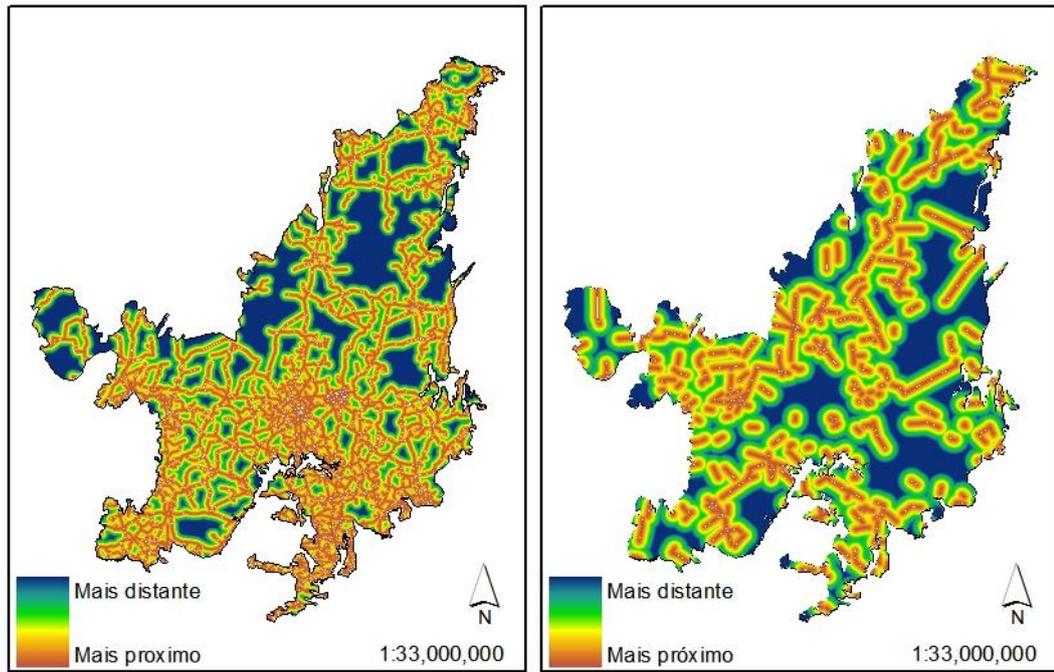


Figura 6 - Distância de vias asfaltadas e de vias de terra

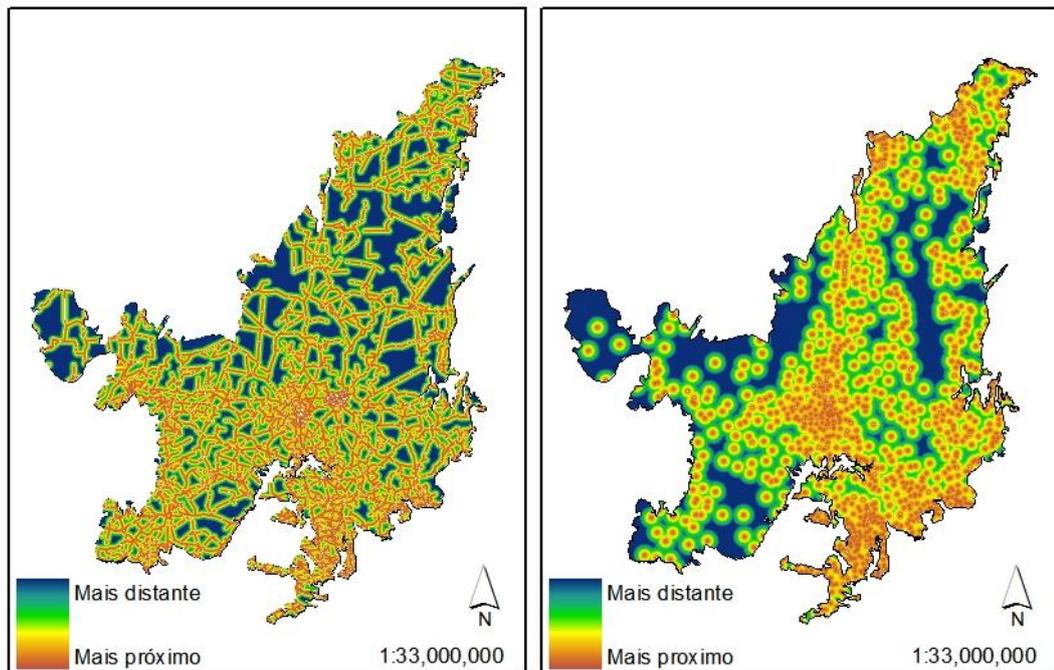


Figura 7 - Distância de vias rodoviárias e de Cidades

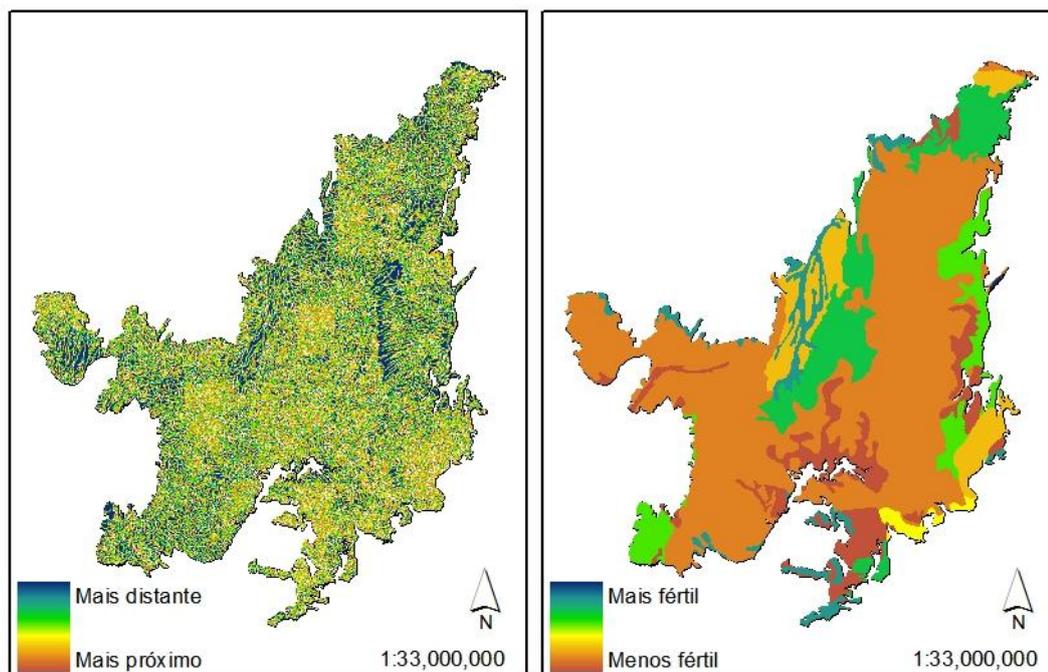


Figura 8 - Distância de rios e fertilidade do solo

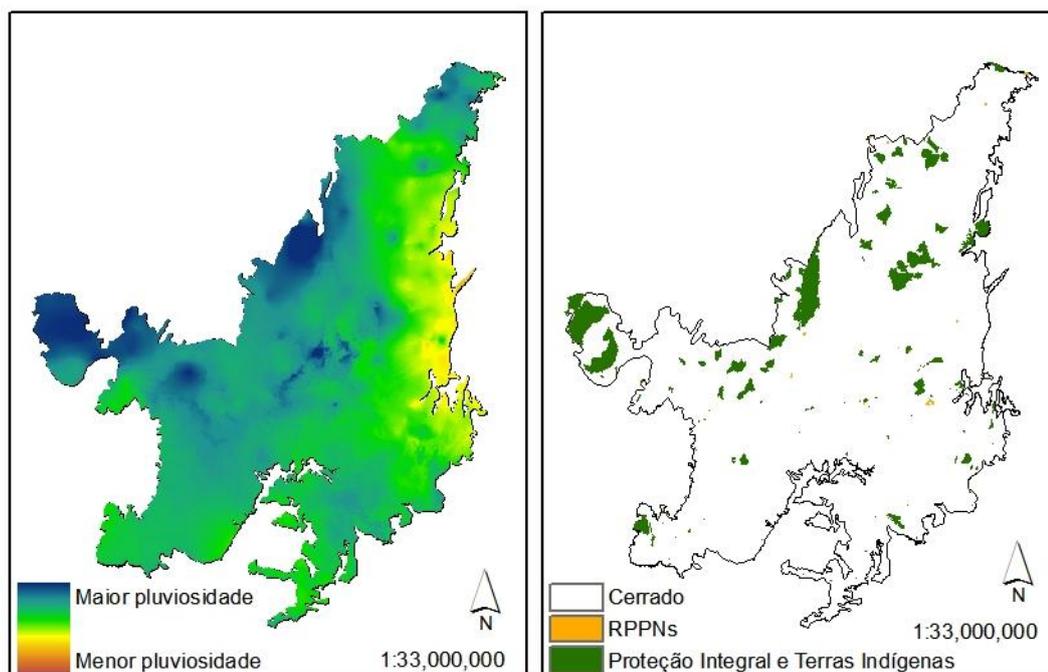


Figura 9 - Pluviosidade acumulada e Unidades de Conservação de Proteção Integral e Terras Indígenas

Para que uma variável fosse incluída ao modelo, a mesma deveria preencher dois critérios: poder de explicação para o modelo e não redundância com outra variável. Para o primeiro critério, as variáveis foram testadas segundo a estatística de V de Cramer ( $\phi$ ), que avalia a associação entre duas variáveis nominais, baseada no teste do qui-quadrado,

variando de 0 a 1, sendo 0 nenhuma associação (neste caso, sem poder de explicação) e 1 totalmente associado. Para o teste de V de Cramer as variáveis tiveram sua associação testada em relação ao desmatamento ocorrido entre  $t^1$  e  $t^2$ . As variáveis com V de Cramer maior que 0,15 foram incluídas ao modelo, pois o valor sugere uma razoável adequação de uma variável (EASTMAN, 2009). Esse procedimento foi realizado por meio da função *Test Driver Variables* do LCM IDRISI Taiga 16.

O segundo critério busca identificar e retirar variáveis que apresentem uma elevada colinearidade, aspecto que tornaria redundante inserir ambas no modelo. Para tanto, foi elaborada uma matriz de correlação de Pearson ( $\rho$ ), que varia de -1 a 1, sendo -1 correlação inversa perfeita. Valores próximos a 0 (zero) indicam que as duas variáveis são independentes (mas pode haver uma relação não linear), enquanto 1 significa correlação perfeita e positiva entre as duas variáveis. Essa avaliação foi feita por meio da função PCA – *Principal Component Analysis*, do IDRISI Taiga 16. Como critério de exclusão, foi adotado que caso duas variáveis tivessem valor de correlação maior que 0,6, aquela com com menor V de Cramer seria eliminada do modelo.

Ao serem inseridas no modelo, as variáveis devem ser classificadas como estáticas, caso não se alterem com o tempo, ou dinâmicas, se alterando no decorrer do tempo. Nesse segundo caso se incluem as variáveis relacionadas à infraestrutura e ações antrópicas. Para este modelo, as variáveis distância de desmatamento, agropecuária e agricultura foram selecionadas como dinâmicas, o que implica dizer que foram recalculadas para elaboração dos cenários (maiores detalhes em CENÁRIOS).

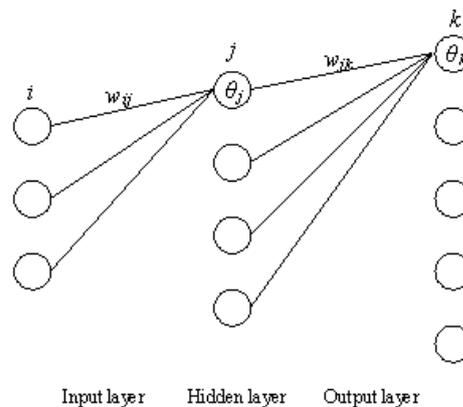
## **2.2. REDE NEURAL**

Redes neurais são modelos matemáticos baseados no conceito biológico de redes neurais humanas (GONZALEZ, ETTER, *et al.*, 2011; EASTMAN, 2009). Isso significa dizer que um conjunto de neurônios artificiais (*neu-ron*) interconectados adquirem determinada informação com o próprio sistema, a qual é então incorporada/processada e posteriormente e disponibilizada ao restante da rede de *neu-ron* (HAYKIN, 1999).

Os modelos de redes neurais têm apresentado resultados robustos em ambientes com muito ruído, além de aceitarem variáveis complexas (JI, 2000). Com o avanço dos modelos de rede neural surgiram diferentes tipos de arquitetura, entre elas, os modelos de rede neural de percepção de multicamadas (*MLPNN - multi-layer perceptron neural*

*network*), os quais têm sido amplamente utilizados para identificar tendências de mudança de uso do solo com base em múltiplas variáveis (KAVZOGLU e MATHER, 2003; MAS, PUIG, *et al.*, 2004).

Os *MLPNN* são constituídos de diversas camadas de unidades computacionais interconectadas de forma que cada nó (*neu-ron*, neurônio) de uma camada tem conexão com o nó da próxima camada (Figura 10). As camadas são divididas em três: camada de entrada (*input*), camadas escondidas (*hidden*) e camada de saída (*output*) (EASTMAN, 2009).



**Figura 10 – Esquema de Camadas e nós.  $i$  no de entrada,  $j$  nó escondido,  $k$  nó de saída,  $w_{ij}$  peso do nó de entrada para o nó escondido,  $w_{jk}$  peso do nó escondido para o nó de saída,  $\theta_j$  viés da camada escondida,  $\theta_k$  viés da camada de saída.**

Conforme os dados de entrada alimentam os nós com informações (sinal) essas informações avançam pela rede, acumulando e propagando informações advindas de outros nós, percorrendo as camadas, até que alcançam um determinado nível de ativação (*activation level*) de mudança de estado da camada de nós de saída. Para se chegar a uma solução final, a rede passa, em linhas gerais, pelas seguintes fases: treinamento, incorporação do aprendizado, correção dos erros e pesos (Regra Delta) e o cálculo do erro quadrático médio (*root mean square – RMS*).

Inicialmente são utilizadas amostras dos pixels com mudança de uso do solo conhecida como treinamento para o modelo, pois tal procedimento ajuda a revelar a relação entre as variáveis e os níveis de ativação dos nós de saída da rede. Ao final do processo, os pixels com maior nível de ativação são representados como aqueles onde deve acontecer o desmatamento.

Para que haja acúmulo de aprendizagem, na fase de treinamento, a rede utiliza a técnica de Propagação Reversa (*back-propagation*). A Propagação Reversa consiste basicamente em dois passos, um para frente (*forward*) e um para trás (*backward*), em que são realizadas as modificações no estado dos nós de acordo com os pesos atribuídos pelo sistema. Cada amostra é alimentada pela camada de entrada e o nó receptor soma os sinais ponderados de todos os nós a que está ligado na camada anterior. Isso se dá por meio da seguinte fórmula (EASTMAN, 2009):

**Equação 1 – *Back-Propagation* Formula de propagação da aprendizagem durante o treinamento**

$$net_j = \sum_{i=1}^m w_{ij} o_i$$

Sendo “ $W_{ij}$ ” o peso entre o nó “ $i$ ” e o nó “ $j$ ” e “ $O_i$ ” a saída do nó “ $i$ ”. O dado de saída tem um nó “ $J$ ” que é computado a partir da seguinte equação:

**Equação 2 - Dado de saída em função dos nós da rede**

$$O_j = f(net_j)$$

Com o treinamento, a rede neural é capaz de gerar vários valores (pesos das ligações) para as relações entre as variáveis, que são incorporados ao modelo (aprendizagem), auxiliando-o, assim, a simular o processo de mudança de uso do solo (EASTMAN, 2009). Ao final do treinamento, novos dados aprendidos são fornecidos à rede para calcular níveis de ativação dos diferentes nós.

Por meio da função  $f$  (sigmoideal não linear), é aplicada a soma dos pesos da entrada. Na sequência, a informação é passada para a próxima camada; uma vez que a passagem para frente termina, os nós de saída ativados são comparados com a resposta esperada para eles. Ao final, cada nó de saída é associado a uma mudança de estado, sendo gerado um valor que indica a similaridade entre os dados de entrada e valor correspondente de saída (EASTMAN, 2009).

As informações aprendidas com os dados de treinamento são transmitidas através da rede antes que os erros e pesos sejam propagados, procedimento este denominado *epoch*. Este erro é então propagado para trás, com pesos para conexões corrigidas por meio de uma relação conhecida como a regra Delta (EASTMAN, 2009):

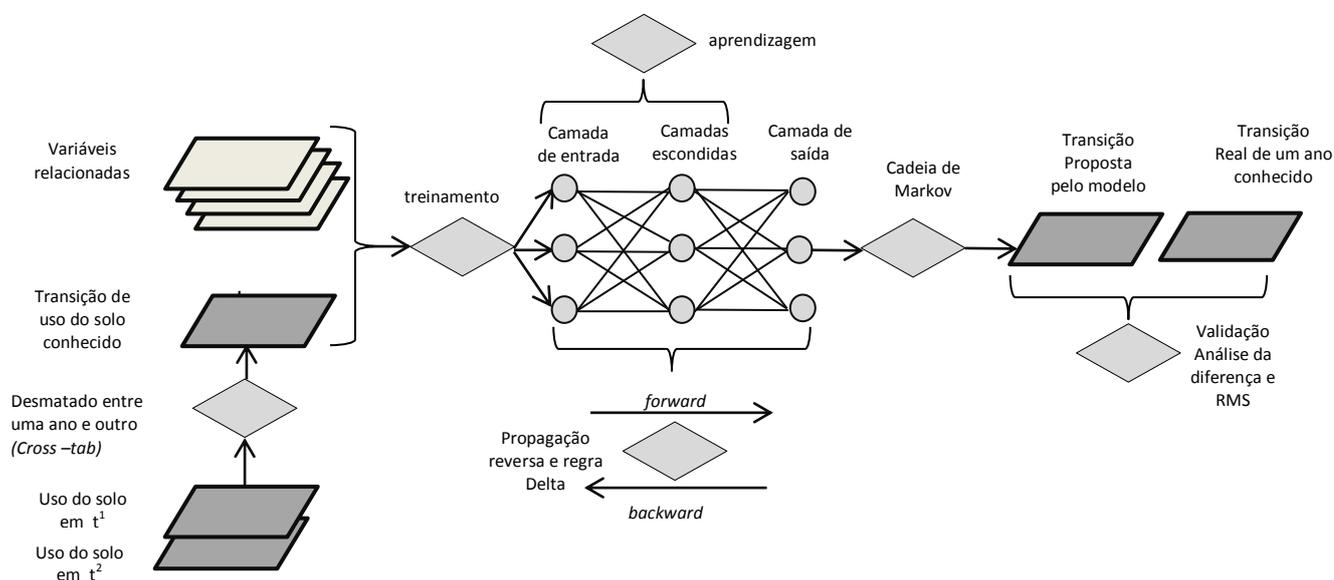
**Equação 3- Equação para Regra Delta, procedimento de correção.**

$$\Delta w_{ji(t+1)} = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta w_{ji(t)}$$

Sendo,  $\eta$  a taxa de aprendizagem  $\alpha$  o fator momentâneo e  $\delta$  o erro computado.

O movimento, para frente e para trás, continua até que a rede tenha aprendido as características relacionadas à solução correta de todas as classes. Assim, após a fase de treinamento, a rede consegue os pesos adequados para as conexões entre os nós das múltiplas camadas, trazendo maior acurácia ao dado de saída. Desse modo são gerados dados de saída representando a mudança de estado de acordo com os nós com mais alto nível de ativação. Não é esperado que o dado de saída da rede seja igual ao dado real, pois é quase certo que existam erros na rede, o que levam à diferença entre o dado de saída e os reais (EASTMAN, 2009; ALMEIDA, GLEIRIANI, *et al.*, 2008).

Ao final, a taxa de erro aceitável é calculada de acordo com o erro associado ao aprendido da rede, avaliada de acordo com a raiz quadrada média (*root mean square – RMS*). Segue figura 11 com esquema detalhado do modelo.



**Figura 11 - Diagrama do modelo de predição de mudança de uso do solo**

Markov é um processo aleatório discreto que calcula a probabilidade da distribuição de valores em um dado estágio de um sistema, sendo que o estágio seguinte e todos os estágios futuros dependem apenas do estado atual do sistema e não dos estados de estágios anteriores (GUAN, GAO, *et al.*, 2008). É usualmente utilizada na predição de

características (estágios) geográficas desconhecidas, tornando-se um método de previsão importante na pesquisa geográfica (CLANCY, TANNER e MCWILLIAM, 2010). A análise da cadeia de Markov é uma ferramenta pertinente para modelagem de mudanças do uso do solo de difícil descrição, e serve como um indicador da magnitude da mudança no futuro, uma vez que tem capacidade de projetar tendências quantitativas mudança de uso do solo (BENITO, CUEVAS, *et al.*).

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

**Figura 12 - Matriz de Markov**

A cadeia Markov é utilizada para prever a matriz de transição quanto ao aspecto quantitativo (Figura 12). Nela, “A” é a matriz de transição para o período de simulação, “ $A_{ij}$ ” é a soma das áreas do estado “ $i$ ” para o estado “ $j$ ”, ou seja, do período conhecido para o período simulado, e “ $n$ ” é o número de tipos de uso. Ou seja, por meio da cadeia de Markov são calculados quantos dos pixels associados aos nós com maior nível de ativação irão mudar de estado, no caso, de cerrado para desmatado. Portanto a cadeia de Markov pode prever a quantidade da mudança de uso do solo, mas não pode apresentar o processo espacial da dinâmica de mudança associada (YANG, ZHENG e LV, 2012).

Desta forma, os mapas de saída, de potencial de transição, podem ser utilizados para representar o grau de apoio que o modelo encontra para a mudança de uso do solo em questão (EASTMAN, 2009).

### 2.3. MODELO

Para o modelo, foram introduzidas as imagens  $t_1$  e  $t_2$ , como anteriormente dito, sendo obtido o balanço de área desmatada de 2002 para 2009 (*Change Analysis*), e criado uma mapa da área desmatada no período.

Com a comparação da área desmatada entre  $t_1$  e  $t_2$ , foi criado um mapa da tendência espacial do desmatamento, por meio de uma superfície de interpolação com base num polinômio de nona ordem (*Spatial Trend of Change*), a fim de identificar, de maneira generalizada, as regiões com mais áreas desmatadas.

Após essas análises preliminares, foram incluídas as variáveis selecionadas de acordo com os critérios anteriormente comentados (*Transition Sub-model Structure*). Na sequência, foram estabelecidos os parâmetros para a execução da rede neural propriamente dita, onde foi selecionado como conjunto amostral o valor máximo de pixels “desmatados” e mantidos os parâmetros de treinamento com os valores padrão<sup>2</sup>, com exceção do número de nós. Para selecionar o número de nós foram testados<sup>3</sup> valores no intervalo de três até o número de variáveis do modelo, conforme sugerido por Eastman (2009), e posteriormente selecionado o valor que gerou o modelo com maior taxa de acurácia (Figura 13).

Na sequência, o modelo foi executado (*Run Transition Sub-Model*) com os valores de critérios de finalização padrão<sup>4</sup>, o que significa dizer que o modelo assume a solução acumulada até ter alcançado um dos valores de finalização.

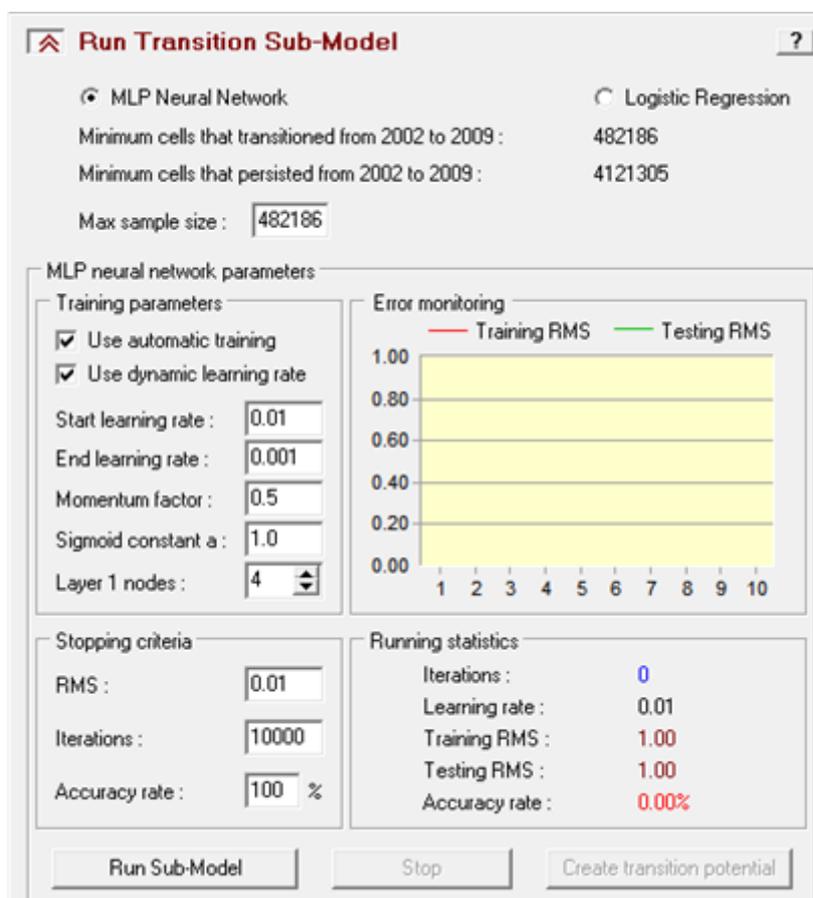


Figura 13 - Painel de seleção dos parâmetros, critérios de finalização da rede neural do LCM IDRISI Taiga

<sup>2</sup> Treinamento automático, dinâmica de aprendizagem automática, fator monumental 0.5, constante Sigmoid 1.0, e números de nós 3.0.

<sup>3</sup> Esses testes foram feitos executando o modelo com um número reduzido de pixels amostrais (100).

<sup>4</sup> Erro médio quadrado (RMS) 0,01; interações 10.000; e taxa de acurácia 100%.

O produto da execução do *Run transition Sub-Model* é a imagem de Potencial de transição, também chamada de *soft prediction*, a qual indica a probabilidade que cada pixel tem de ser convertido de área nativa para área antrópica. Em seguida, foi executada a Cadeia de Markov que determinou quantos dos pixels com maior chance de conversão serão de fato considerados desmatados. A partir do valor encontrado na Cadeia de Markov é criada a projeção para o período conhecido  $t_3$  (*Change Allocation*). Esse resultado é também conhecido como *hard prediction*, que é a imagem final resultante do modelo a ser validado.

## 2.4. VALIDAÇÃO

A validação é um processo imprescindível na análise dos modelos de predição de mudança de uso do solo tanto por ser o processo capaz de indicar a validade ou não do modelo quanto por demonstrar onde o modelo deve ser melhorado. Para a validação foi utilizada a reconhecida proposta metodológica de Pontius Jr. (2004) por meio da função *validate* do próprio IDRISI Taiga.

A proposta de Pontius Jr. et al (2004) fornece um método para medir o acordo entre dois mapas, um modelado e um de referência, com o objetivo principal de responder às seguintes questões: Quanto um par de mapas coincide, em termos da quantidade de pixels e da localização dos pixels em cada categoria (EASTMAN, 2009). Isso é feito por diversos índices, sendo os principais e utilizados nesse trabalho: o acordo ao acaso –  $N(n)^5$ , acordo de quantidade –  $N(m)$ , acordo padrão –  $M(m)$  e acordo com localização ajustada –  $P(m)$ , além do Kappa padrão e o Kappa *for no information* ( $K_{no}$ )

Os indicadores  $N(m)$  e  $M(m)$  e  $P(m)$ , trazem informações sobre qual o acerto entre o mapa de referência e o mapa modelado em diferentes graus de informação tanto de localização dos pixels de cada categoria, quanto da quantidade deles por categoria (PONTIUS JR, HUFFAKER e DENMAN, 2004).  $N(m)$  refere-se ao acordo entre os mapas, sendo que no mapa modelado a localização dos pixels é embaralhada aleatoriamente. Portanto, há informação de quantidade, mas não há informação de localização.  $M(m)$  indica a porção de acerto entre os mapas propriamente ditos, sem alterações, nem em quantidade nem em localização dos pixels.  $P(m)$  é o acordo entre o mapa de referência e um mapa de comparação modificado, onde a modificação é

---

<sup>5</sup> Nesta notação, a primeira letra maiúscula indica o grau de informação referente à localização do pixel, sendo  $N$  – *no information*,  $M$  – *médium information* e  $P$  – *Perfection information*. A letra minúscula entre parêntese indica o grau de informação referente à quantidade da mesma forma.

reorganizar o mais perfeitamente possível a localização de células dentro do mapa, a fim de maximizar o acordo entre o mapa modelado modificado e o mapa de referência (EASTMAN, 2009).

O índice Kappa (K) é uma medida da concordância entre conjuntos (no caso imagens) e mede o grau de concordância além do que seria esperado tão somente pelo acaso. Essa medida tem valor máximo 1, que representando acordo total, 0 (zero) que indica concordância esperada pelo acaso e abaixo de 0 concordância menor que a esperada ao acaso.

**Equação 4- Equação de K para a função *CROSSTAB* e *Validate* do IDRISI Taiga**

$$K_{standard} = \frac{M(m) - M(n)}{1 - M(n)}$$

O índice Kno define quanto do acordo entre os mapas não coincide por acaso e quanto há para se acertar para além do acaso.

**Equação 5 - Equação de Kno para a função *CROSSTAB* e *Validate* do IDRISI Taiga**

$$Kno = \frac{M(m) - N(n)}{1 - N(n)}$$

Contudo, as análises pixel a pixel apresentadas até então falham ao detectar padrões espaciais relacionados à vizinhança, considerando como desacordo (erro) classes diferentes entre os mapas, mesmo que elas estejam imediatamente no pixel ao lado no mapa de referência (PONTIUS JR, HUFFAKER e DENMAN, 2004). Para eliminar essa falha, a validação é feita por comparação em múltiplas resoluções, o que consiste em recalculas as estatísticas de acordo com as imagens em diferentes resoluções (reamostragem dos pixels). Com esse procedimento é possível selecionar a escala de saída a que o modelo melhor se aplica. Essa reamostragem tende a apresentar melhora na estatística conforme se aumenta o tamanho do pixel. Contudo, faz-se necessário demonstrar que o mapa modelado tem maior relação como o mapa de referência do mesmo ano do que o mapa de  $t_1$ . Para isso as estatísticas de acordo são também calculadas entre o mapa de referencia,  $t_2$ , e de comparação,  $t_1$ , a partir do denominado modelo nulo, e os resultados comparados com os resultados encontrados para o par de mapas de referência ( $t_2$ ) e de comparação modelado.

Para se ter uma noção mais precisa da validade e permitir a percepção em escala regional do grau de validade do modelo, todo procedimento foi feito por região hidrográfica e agrupamentos de regiões hidrográficas (Figura 14).

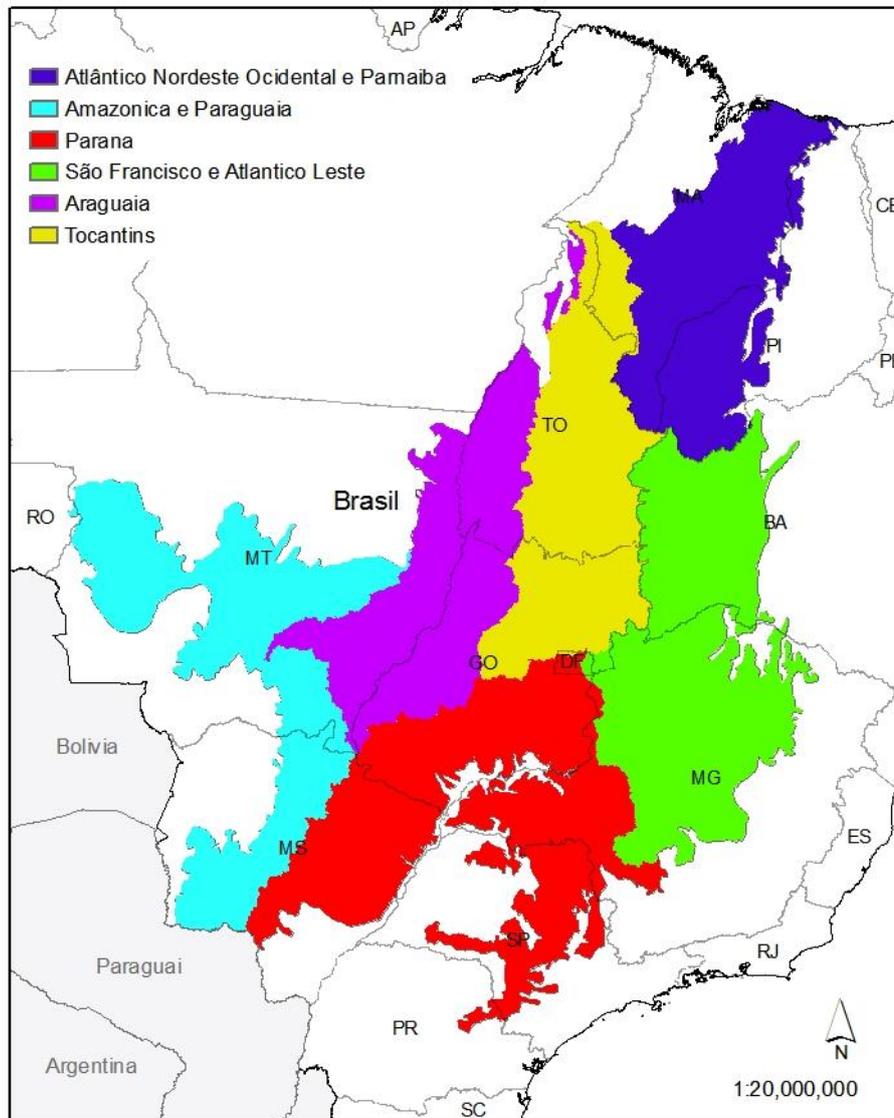


Figura 14 - Limites para análise de validação

## 2.5. CENÁRIOS

Após o modelo ter sido validado, foram gerados os cenários década após década durante cinquenta anos, de 2020 a 2060.

O Cenário base é aqui chamado de *Business as Usual* – BAU, já que incorpora a tendência de desmatamento regularmente observada entre os períodos das imagens, tendo como base para as projeções a probabilidade de desmatamento calculada pela cadeia de Markov. A cadeia de Markov é recalculada para cada período (2020, 2030, 2040, 2050 e

2060) e as variáveis dinâmicas (distância de desmatamento) recalculadas cinco vezes<sup>6</sup> para cada período, como em todos os cenários.

O Cenário de Intensificação do Desmatamento – ID busca espacializar o desmatamento caso ele se intensifique, mais exatamente dobre. Portanto, nesse cenário os valores de probabilidade de desmatamento da cadeia de Markov foram duplicados para cada um dos períodos projetados.

Já o Cenário de Implementação de Políticas Conservacionistas – IPC, que objetiva espacializar os efeitos de redução do desmatamento em caso de restrições locais às atividades que tenham como efeito o desmatamento, utilizou-se da função *Zoning – Constraints* do LCM IDRISI Taiga (EASTMAN, 2009). Essa função permite definir áreas onde a probabilidade de mudança de uso do solo (desmatamento no caso) seja ponderada por um valor definido pelo usuário. Tal abordagem possibilitou simular restrições de desmatamento em áreas chave para conservação ambiental, especificamente: Unidades de Conservação de Proteção Integral, Unidades de Conservação de Uso Sustentável, Terras Indígenas e Áreas Prioritárias à Conservação<sup>7</sup> (Figura 15). Foram impostos a esses limites diminuições nas taxas de desmatamento nas seguintes proporções, respectivamente: 100%, 50%, 100% e 50% de acordo como seus respectivos graus de proteção. Cabe salientar que esse cenário prevê um efeito de “fuga” do desmatamento, ou seja, os desmatamentos que não ocorreram nas áreas onde foram impostas restrições de uso, ocorreram fora dessas áreas.

---

<sup>6</sup> Idealmente as variáveis deveriam ser recalculadas anualmente, porém, por limitações computacionais, foram recalculadas cinco vezes para o período projetado, sem prejuízo de robustez.

<sup>7</sup> O limite utilizado foi o da atualização das áreas prioritárias do Cerrado, referente a novembro de 2012, até o momento não concluído.

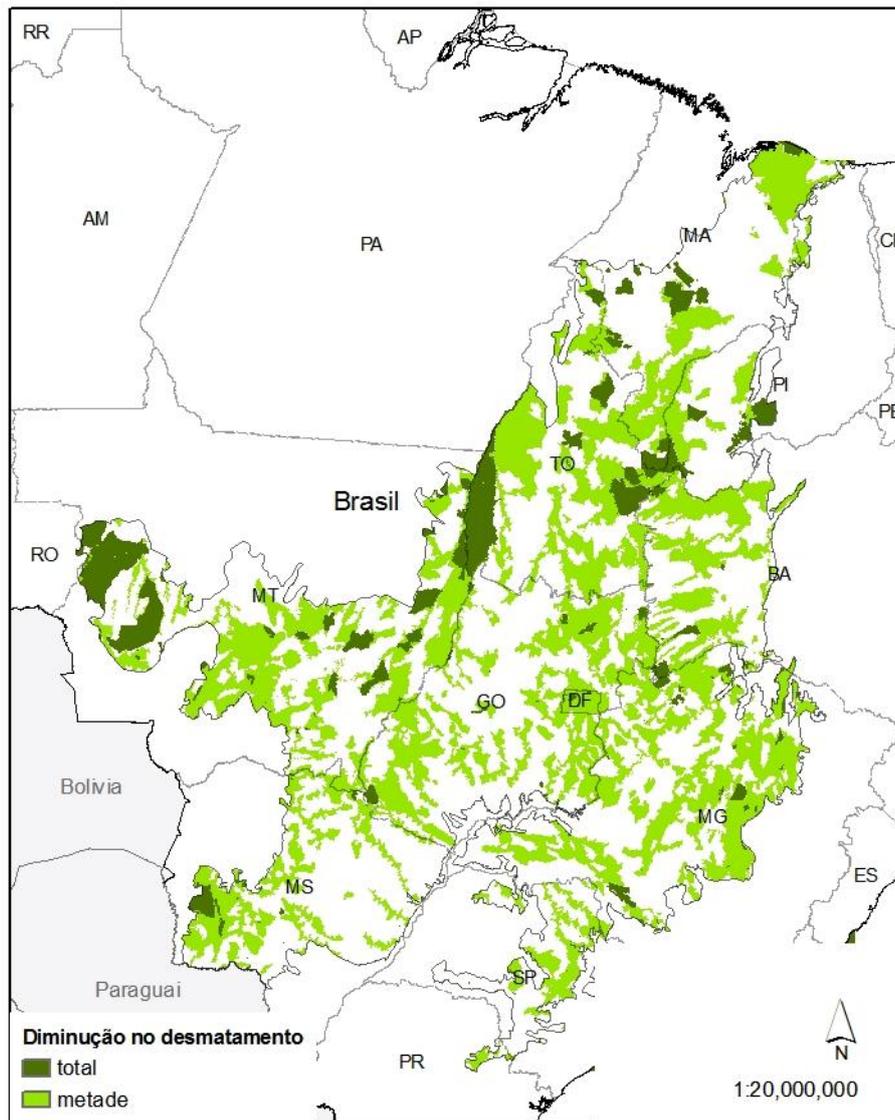


Figura 15 - Áreas com restrições ao desmatamento (*constraints*)

Com os mapas resultantes dos cenários, foram calculadas estatísticas básicas dos fragmentos remanescentes de Cerrado, tais como número de fragmentos, tamanho do fragmento maior, desvio padrão do tamanho dos fragmentos, tamanho médio dos fragmentos, além da proporção total de cerrado remanescente.

Para uma avaliação mais regionalizada foi calculada a proporção de Cerrado por cenário, para cada ano projetado, para cada região hidrográfica, tal qual os limites usados para a validação. Esses cálculos estatísticos foram todos executados no software Arcgis 9.3 (ESRI, 2006) e organizados no programa Excel 2010 (Microsoft, 2010).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. VARIÁVEIS

Segundo os critérios de potencial de explicação para o modelo V de Cramer ( $\phi$ ), apenas a distância de áreas inundáveis e estradas de terra não alcançaram os 0,15 suficientes para serem incluídas no modelo. Houve, contudo, um destaque para a variável distância de desmatamento até  $t_1$ , que teve 0.95, o maior dos valores (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de  $\phi$  das variáveis testadas

Variável	$\phi$
Altimetria	0.19
Declividade	0.15
Distância de cidades	0.18
Distância de Rodovias todas	0.29
Distância asfalto	0.24
Distância estrada da terra	0.04
Distância de rios	0.03
Distância de Desmatamento até $t_1$	0.95
Fertilidade do solo	0.17
Distância de áreas inundáveis	0.14
Pluviosidade acumulada	0.23
Distância Agricultura	0.31
Distância Pecuária	0.47
UC de PI e TI	0.24

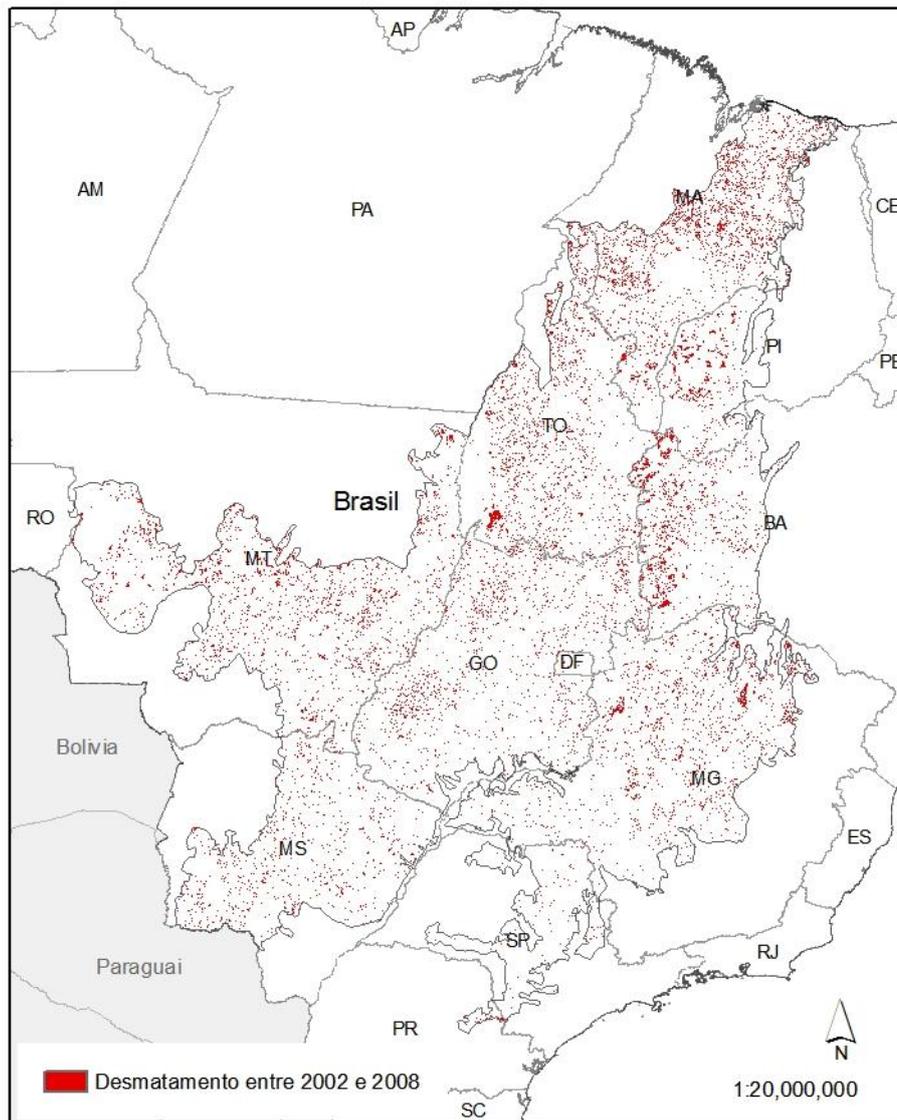
O teste de correlação revelou algumas correlações significativas entre as variáveis, tais como entre distância de estradas e distância de estradas asfaltadas, distância de estradas e distância de cidades, distância de agricultura e altimetria, distância de estradas asfaltadas e distância de pecuária, distância de cidades e distância de desmatamentos até  $t_1$ , distância de pecuária e distância de Unidades de Conservação de Proteção integral e Terras indígenas. Contudo, apenas a relação entre a distância de estradas e distância de estradas asfaltadas alcançou o valor maior que 0,60 e como a variável estradas asfaltadas tem menor  $\phi$ , 0,24, foi eliminada do modelo (Tabela 2).

**Tabela 2 - Matriz de correlação das variáveis testadas, destaque para o valor acima de 0.6**

CORRELAÇÃO	altimetria	declividade	distância asfalto	distância cidades	distância desmatamento t1	distância inundacao	distânciapecuaria	distânciario	distânciaterra	distância todas estradas	distância agricultura	fertilidade do solo	pluviosidade	Proteção Integral e Terra Indígena
altimetria	1.00	0.27	-0.12	-0.10	-0.12	-0.05	-0.06	-0.02	0.09	-0.08	-0.48	-0.10	-0.20	-0.08
declividade	0.27	1.00	-0.06	-0.11	-0.01	0.09	-0.05	-0.04	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01	-0.04	-0.02
distância asfalto	-0.12	-0.06	1.00	0.44	0.45	-0.04	0.32	0.05	-0.11	0.68	0.18	0.01	0.03	0.32
distânciacidades	-0.10	-0.11	0.44	1.00	0.30	-0.11	0.23	0.07	0.09	0.41	0.07	-0.02	0.16	0.26
distância desmatamento t1	-0.12	-0.01	0.45	0.30	1.00	0.00	0.52	0.04	0.06	0.38	0.22	-0.03	0.05	0.60
distância inundacao	-0.05	0.09	-0.04	-0.11	0.00	1.00	0.02	-0.03	0.00	-0.04	0.04	0.04	-0.20	-0.08
distância pecuaria	-0.06	-0.05	0.32	0.23	0.52	0.02	1.00	0.08	0.01	0.26	0.10	-0.09	0.12	0.36
distânciario	-0.02	-0.04	0.05	0.07	0.04	-0.03	0.08	1.00	0.04	0.05	0.00	-0.04	0.02	0.04
distânciaterra	0.09	-0.01	-0.11	0.09	0.06	0.00	0.01	0.04	1.00	0.21	-0.06	0.02	-0.12	0.04
distância todas estradas	-0.08	-0.05	0.68	0.41	0.38	-0.04	0.26	0.05	0.21	1.00	0.10	0.01	0.02	0.29
distância agricultura	-0.48	-0.01	0.18	0.07	0.22	0.04	0.10	0.00	-0.06	0.10	1.00	0.05	0.05	0.14
fertilidade do solo	-0.10	-0.01	0.01	-0.02	-0.03	0.04	-0.09	-0.04	0.02	0.01	0.05	1.00	0.07	0.00
pluviosidade	-0.20	-0.04	0.03	0.16	0.05	-0.20	0.12	0.02	-0.12	0.02	0.05	0.07	1.00	0.13
Proteção Integral e T.I.	-0.08	-0.02	0.32	0.26	0.60	-0.08	0.36	0.04	0.04	0.29	0.14	0.00	0.13	1.00

### 3.2. MODELO

Com o cruzamento (*Change Analysis*) dos mapas t<sub>1</sub> e o t<sub>2</sub>, respectivamente 2002 e 2009, foi gerado o mapa da área desmatada no período (Figura 16), onde estão em vermelho as áreas desmatadas no período.



**Figura 16 - Desmatamento entre t<sub>1</sub> e t<sub>2</sub>**

Com a área desmatada entre  $t_1$  e  $t_2$  foi criado um mapa da tendência espacial do desmatamento (Figura 17), gerando uma superfície de interpolação com base num polinômio de nona ordem, onde os tons de vermelho indicam as áreas com mais desmatamentos e as verdes, com menos.

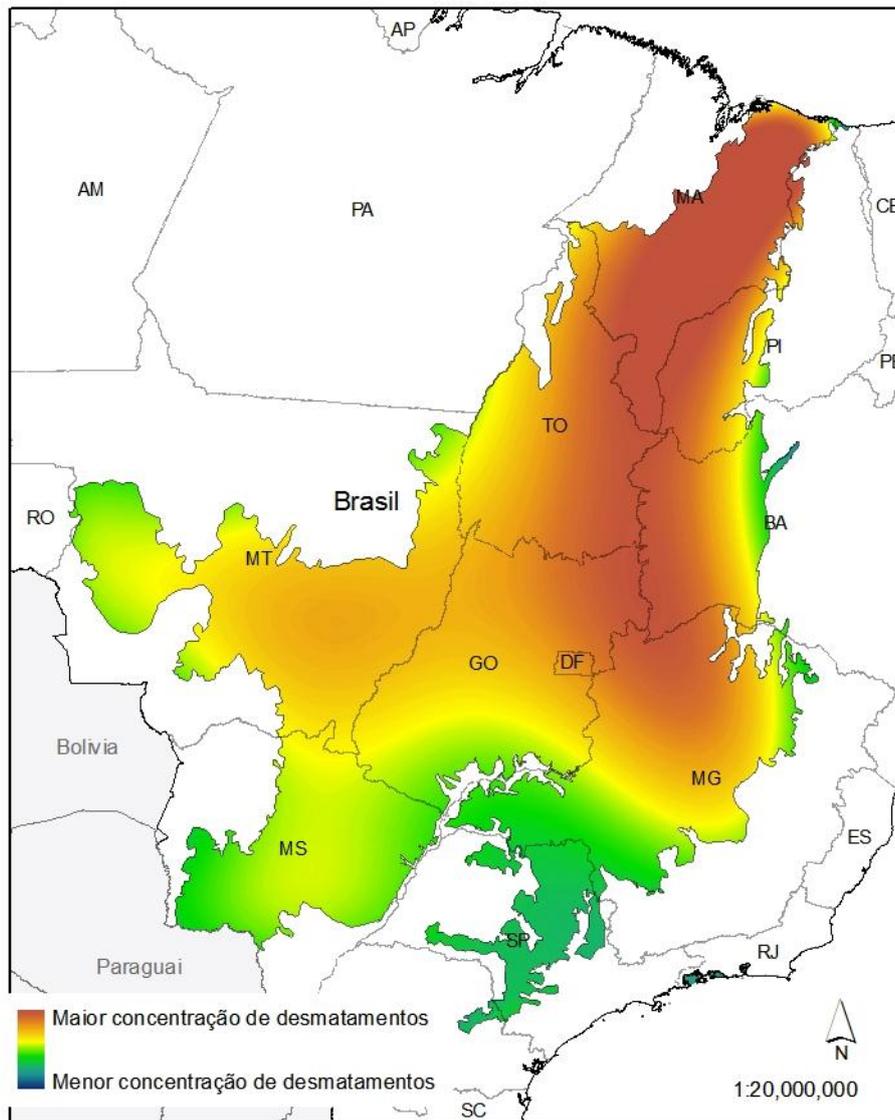


Figura 17 - Concentração de desmatamento entre 2002 e 2008

O único parâmetro do modelo determinado de maneira diferente do padrão foi o número de nós, que por sua vez foi selecionado comparando o desempenho, ou seja, sua acurácia, de diferentes números de nós no modelo (com 100 pixels amostrais). Segundo esse critério, o modelo que obteve melhor desempenho foi o com cinco nós (Tabela 3).

Tabela 3 - desempenho de modelos com diferentes números de nós, com destaque para o modelo com cinco nós

Numero de nós	Acurácia do modelo em diferentes rodadas (%)				média	mediana
3	56.10	52.02	68.13	56.88	58.28	56.49
4	55.34	57.43	54.9	60.08	56.94	56.39
5	62.00	60.4	64.43	68.05	63.72	63.22
6	61.34	59.18	58.76	55.71	58.75	58.97
7	59.41	67.00	56.57	60.04	60.76	59.73

Com as variáveis e parâmetros definidos, o modelo foi executado (*Run Transition Sub-Model*), desta vez com o número máximo de pixels amostrais, o que permitiu maior aprendizagem por parte da rede neural e resultou num modelo com taxa de acurácia de 77,06%.

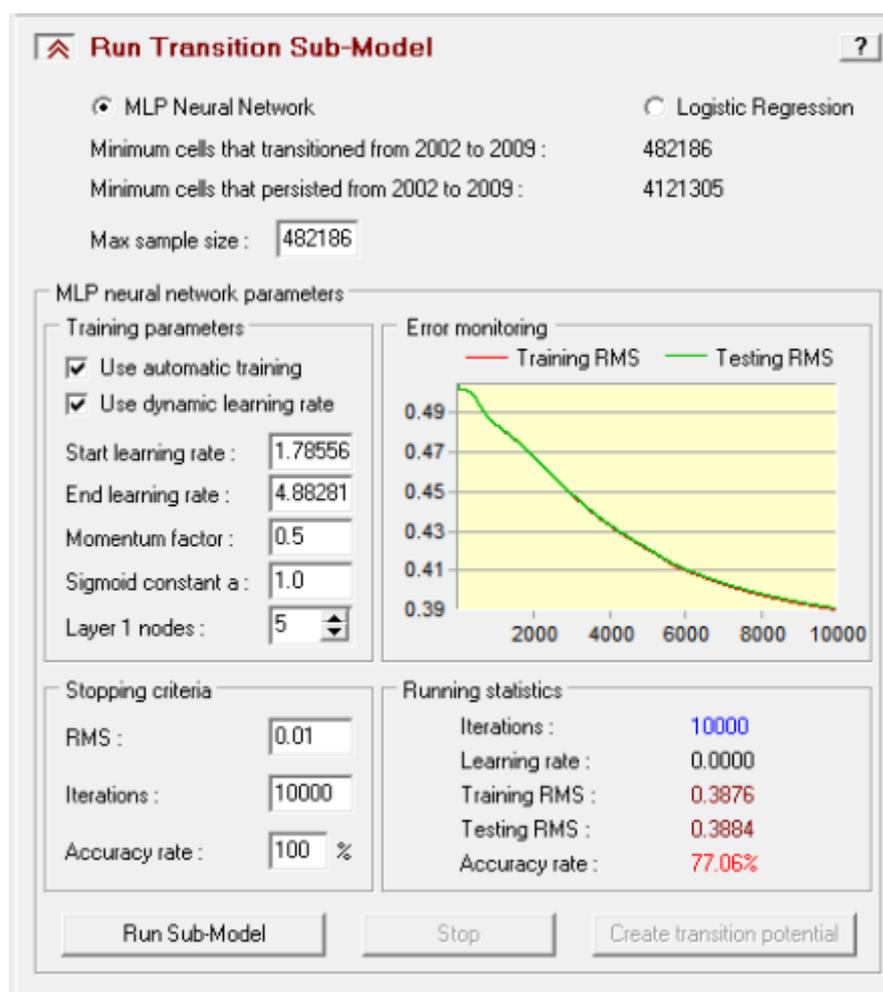
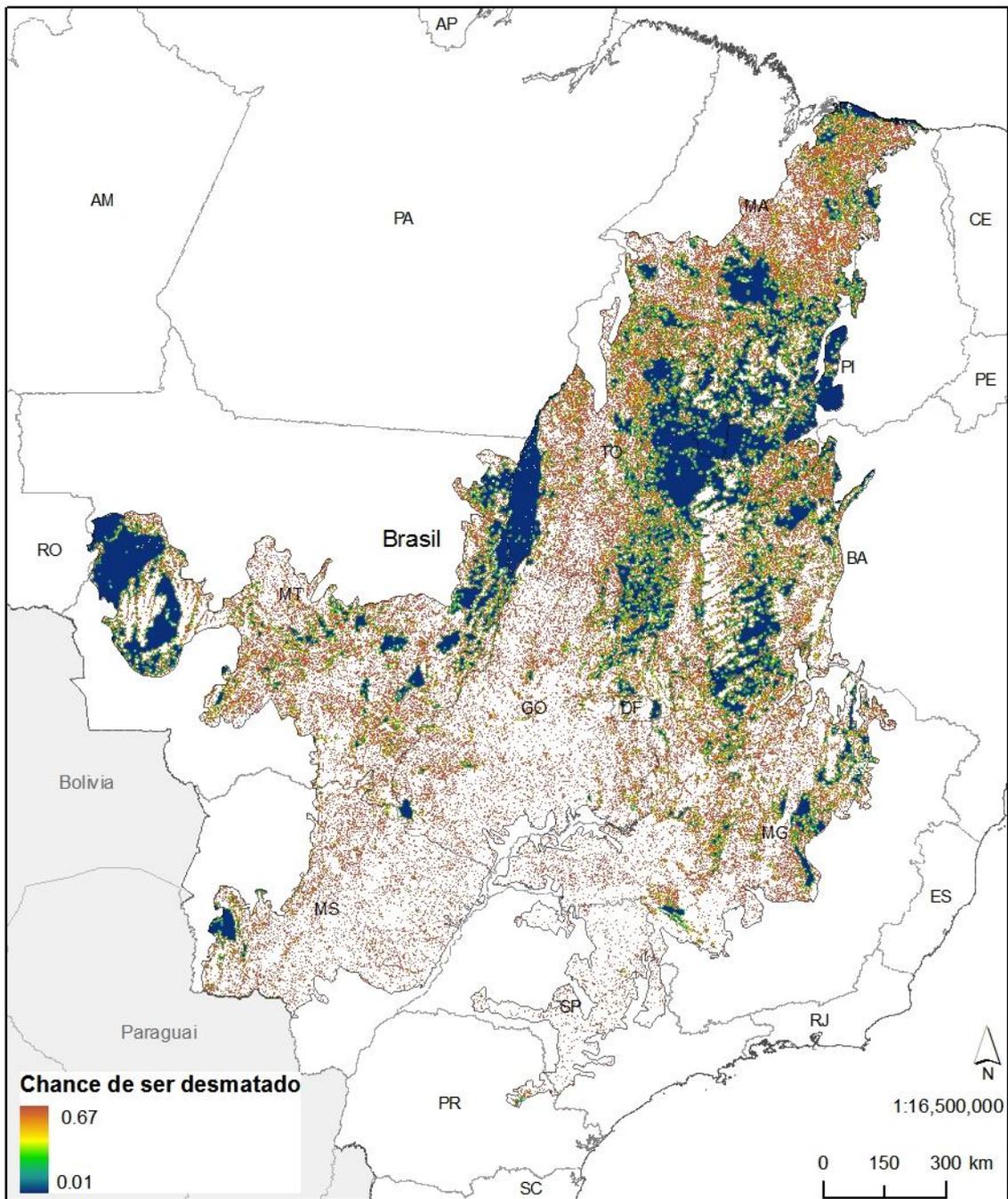


Figura 18 - Painel *Run Transition Sub-Model* com a taxa de acurácia final

Também como resultado do *Run Transition Sub-Model* foi obtido o mapa de potencial de transição, indicando em tons de vermelho as áreas com maior chance de serem desmatadas (*soft prediction*) e em tons de azul, as áreas com menor chance de serem desmatadas entre 2009 e 2010 (Figura 19).



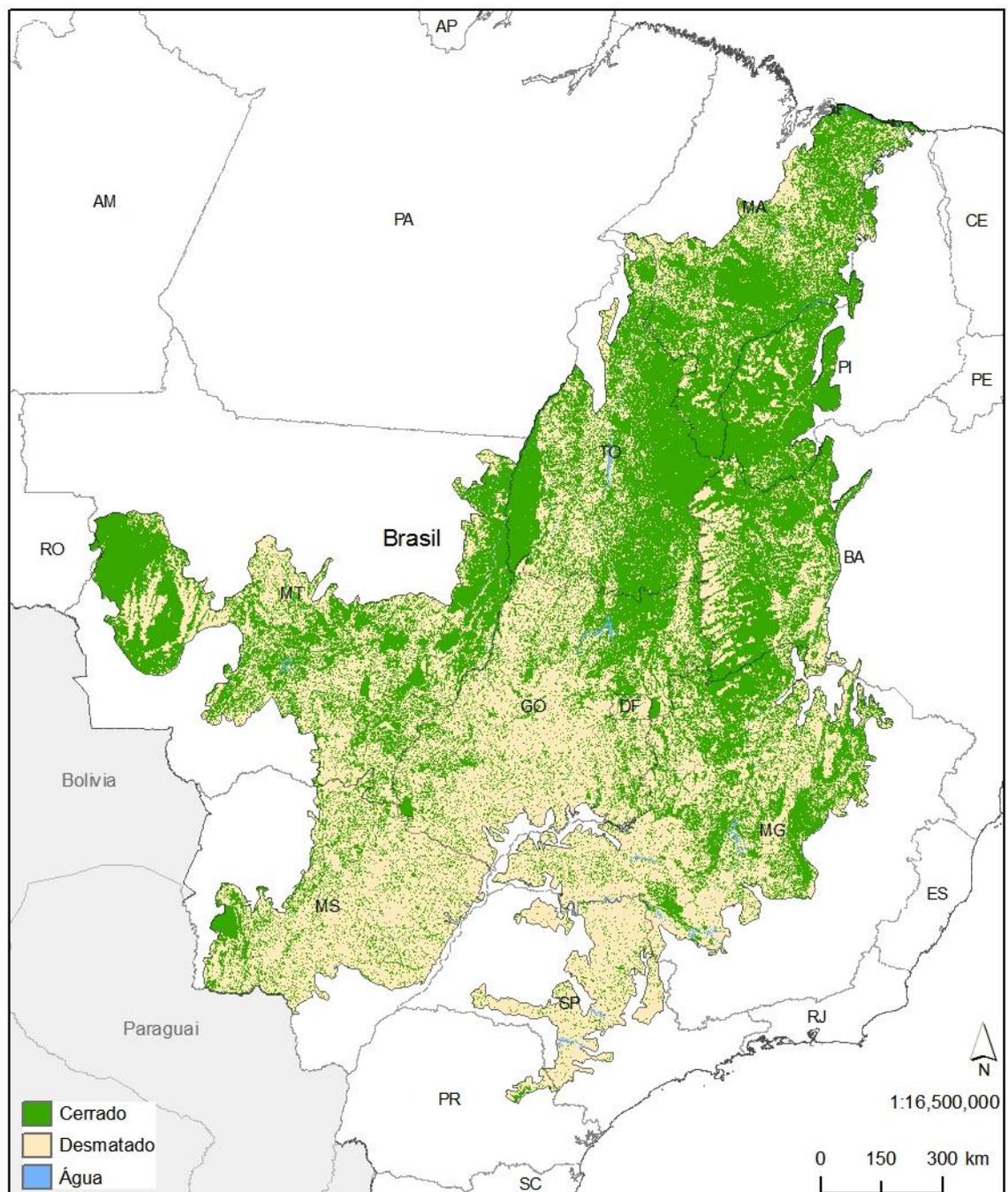
**Figura 19 - Potencial de transição de cerrado para desmatado de 2009 para 2010**

Em seguida foram calculados os valores de definem a quantidade de pixels que serão efetivamente considerados desmatados (Cadeia de Markov) dentro daqueles que foram indicados como com grande propensão a serem desmatados.

Tabela 4- Matriz com os valores de transição de classe do ano de 2009 para 2010.

	Cerrado	Desmatado	Água
Cerrado	0.9845	0.0330	0.000
Desmatado	0.000	1.000	0.000
Água	0.000	0.000	1.000

Com base nesses valores e na *soft precision* foi gerado o mapa modelado para 2010 ( $t_3$  modelado), conforme abaixo.



### 3.3. VALIDAÇÃO

A fim de verificar se o modelo é realmente condizente como o mapa de referência ( $t_3$ ), tanto em termos de distribuição das classes quanto em quantidade de pixels por classe, foram calculadas diversas estatísticas, comparando o desempenho do mapa modelado com o desempenho do modelo nulo ( $t_1$ ) em diferentes resoluções.

A começar pelo acordo segundo  $N(m)$ , no qual a localização dos pixels é embaralhada, de maneira geral o desempenho do modelo propriamente dito e do modelo nulo foi muito próximo, ambos melhoram conforme o pixel é aumentado. O modelo nulo foi ligeiramente melhor sucedido com o pixel em tamanho original, mas a relação se inverteu com pixels de tamanho maior (entre 16 a 32 vezes maior), como pode ser melhor observado na Região Hidrográfica Atlântica Nordeste Ocidental e Paranaíba (Figura 20). A média de  $N(m)$  para resolução inicial para o modelo propriamente dito foi de 0,56 e a do modelo nulo, 0,57; com pixel 16 vezes maior, as médias empatam em 0,77, e com 32 vezes o tamanho do pixel, o modelo propriamente dito passa a ter 0,80 de  $N(m)$  e o nulo, 0,79.

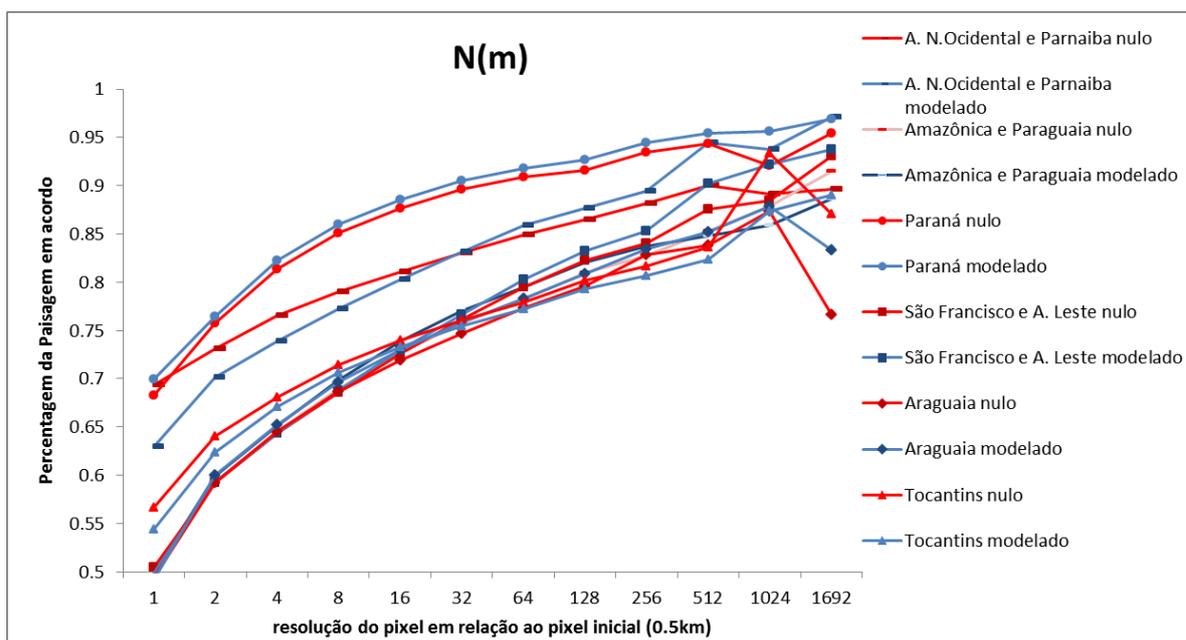


Figura 20 - Comparativo de  $N(m)$  do modelo propriamente dito e do nulo

Quanto à estatística  $M(m)$ , que equivale à proporção de acertos do mapa a ser comparado (modelado e nulo) sem nenhum tipo de modificação com o mapa de referência ( $t_3$ ), foi observada uma clara melhora do desempenho do mapa modelado em relação ao

modelo nulo ( $t_1$ ). Em todas as bacias e em todas as resoluções o mapa modelado se mostrou mais fiel ao mapa de referência, em alguns casos, melhorando o desempenho com resoluções mais grosseiras, enquanto o modelo nulo se manteve sempre estático. A média de acerto para  $M(m)$  no modelo propriamente dito na resolução base foi de 0,98 e o nulo, de 0,56.

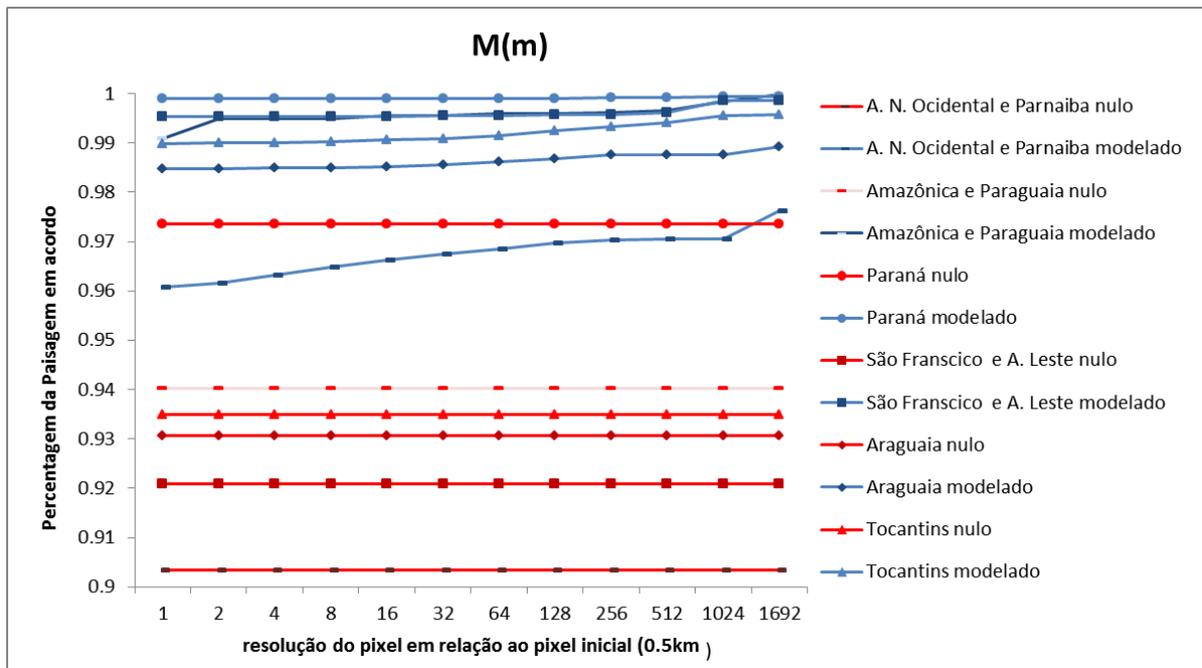


Figura 21-  $M(m)$  resultado por bacias, comparando modelo nulo com modelo propriamente dito

A terceira estatística abordada foi a  $P(m)$ , que ajusta a localização dos pixels dos modelos (sem alterar a quantidade) de maneira a deixá-los mais parecidos com o mapa de referência. Em todas as regiões hidrográficas, o desempenho do modelo propriamente dito foi melhor do que o do modelo nulo, sem nenhuma alteração com mudanças de resolução (Figura 22). A média  $P(m)$  para o modelo foi de 0,993 e do nulo, de 0,946.

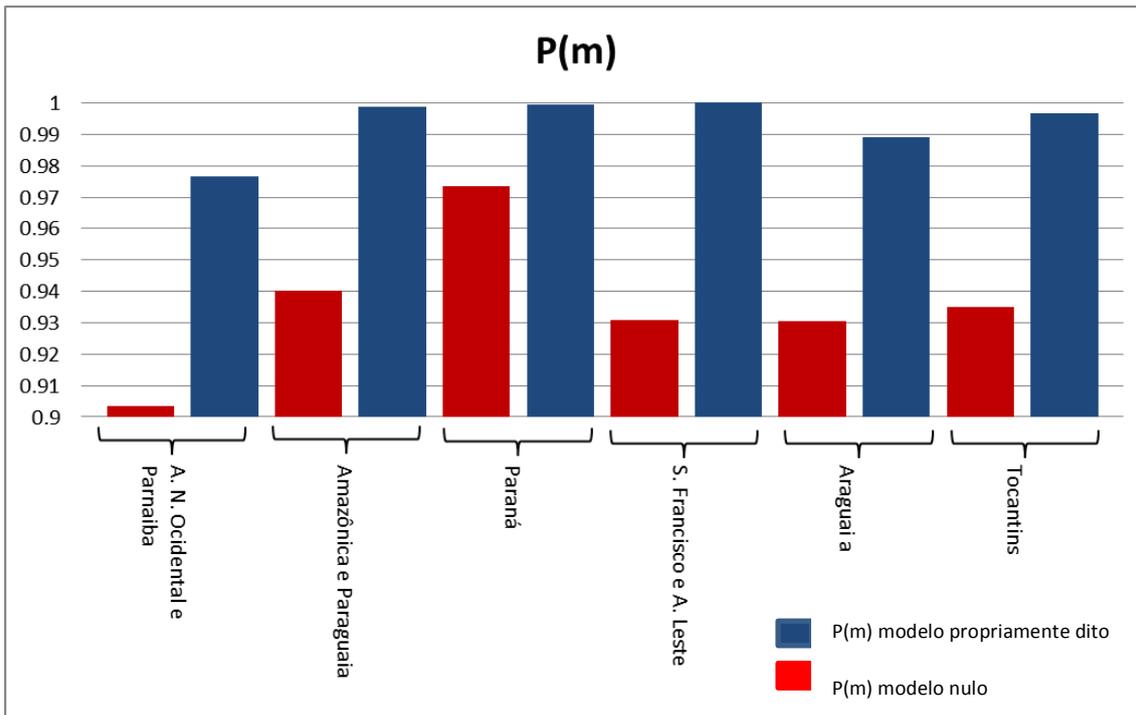


Figura 22 - Comparativo de P(M) do modelo propriamente dito com o nulo

Quanto aos índices Kappa padrão, Kappa *for no information* (Kno), o modelo propriamente dito obteve melhor resultado em todas as bacias em relação ao modelo nulo. A média do K padrão para o modelo foi de 0,96, enquanto que para o modelo nulo foi de 0,84, para o Kno, o modelo propriamente dito teve média de 0,98 e o nulo, 0,91.

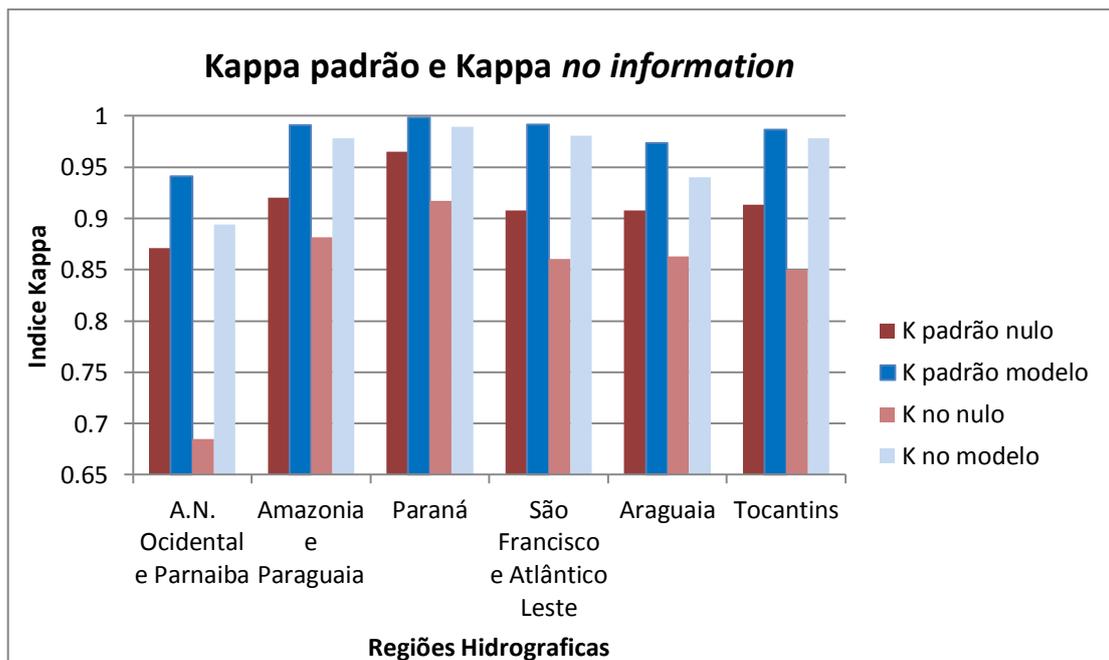


Figura 23 - Índice Kappa nas Regiões Hidrográficas

### 3.4. CENÁRIOS

Conforme apresentado anteriormente, foram gerados três distintos cenários (*Business as Usual* – BAU, Intensificação do Desmatamento – ID, Implementação de Políticas Conservacionistas – IPC) de 2020 até 2050 com intervalos de 10 anos.

O Cenário *Business as Usual* – BAU, que incorpora a tendência de desmatamento observada entre os períodos das imagens obteve resultado intermediário entre os demais cenários, chegando em 2060 com 22,4% de Cerrado (Figuras 24 a 28)

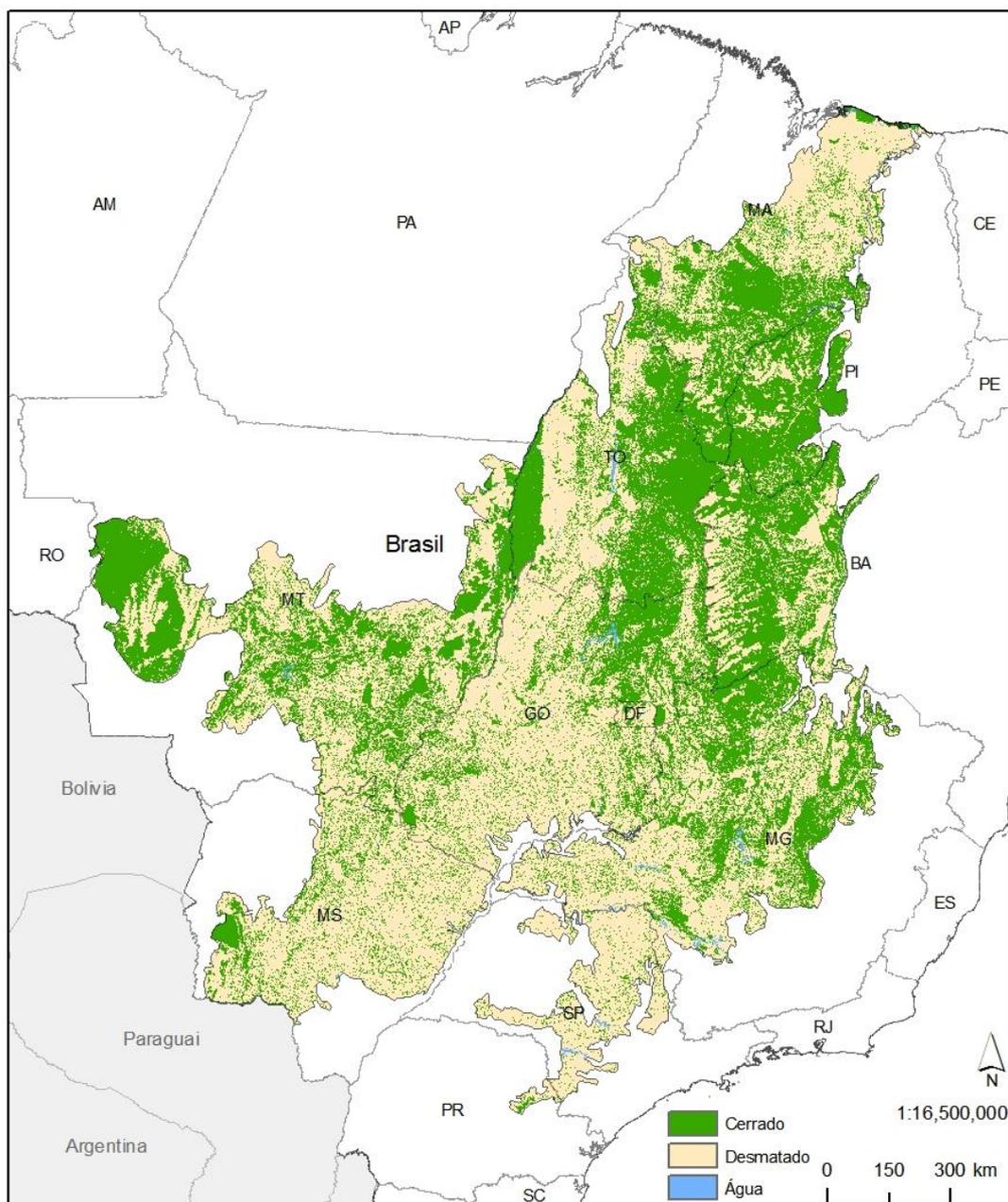


Figura 24 - BAU 2020

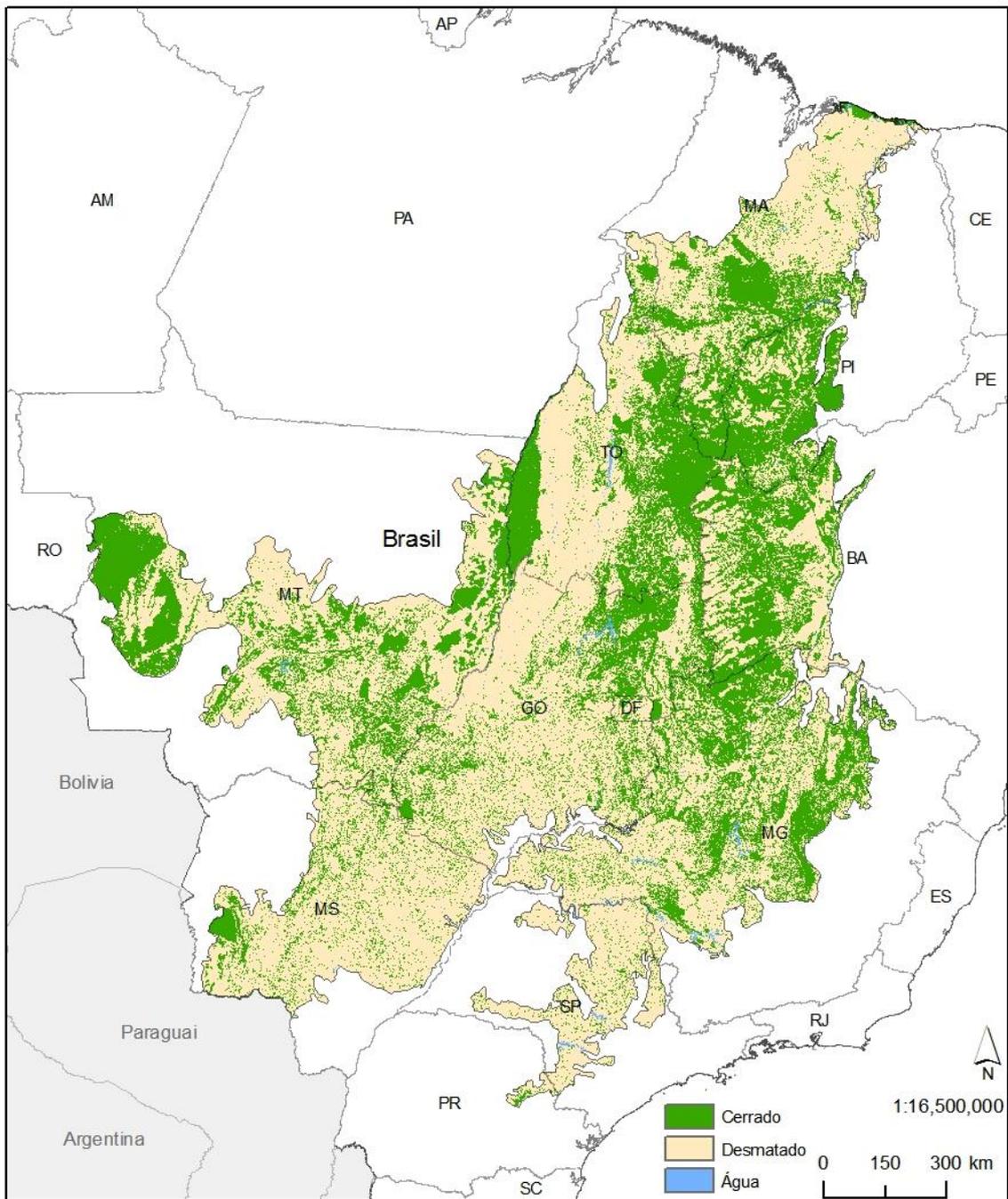


Figura 25 - BAU 2030

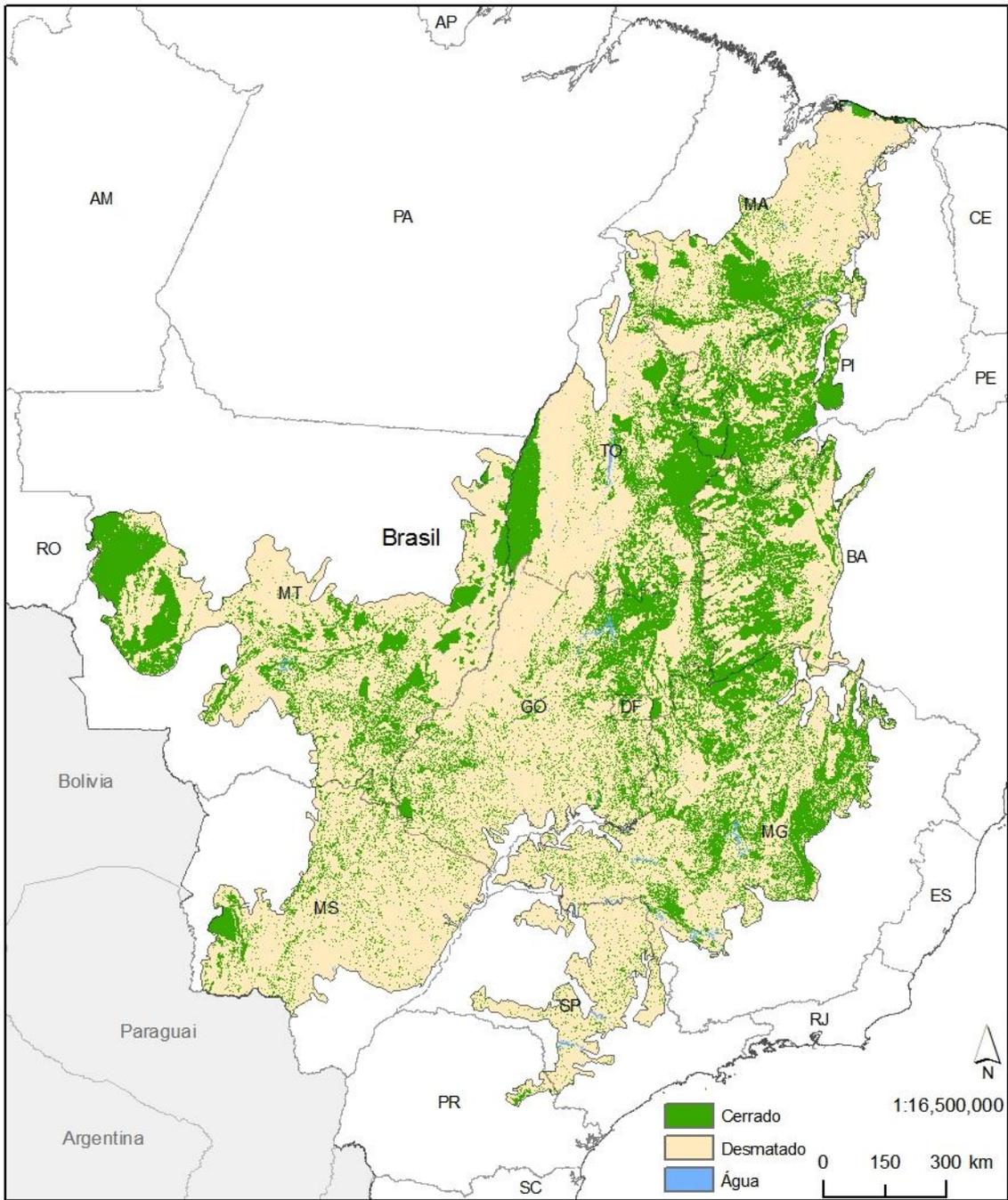


Figura 26 - BAU 2040

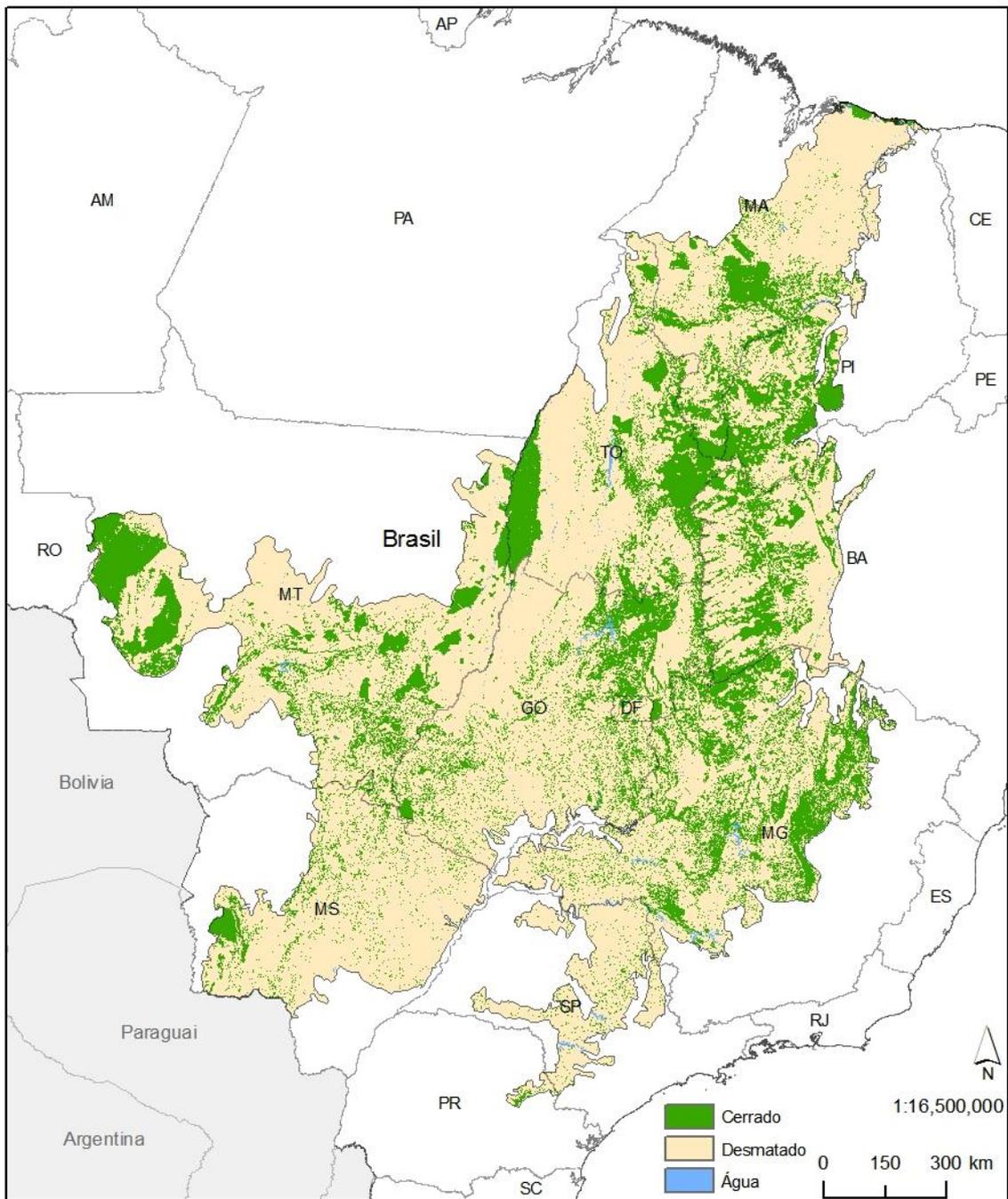
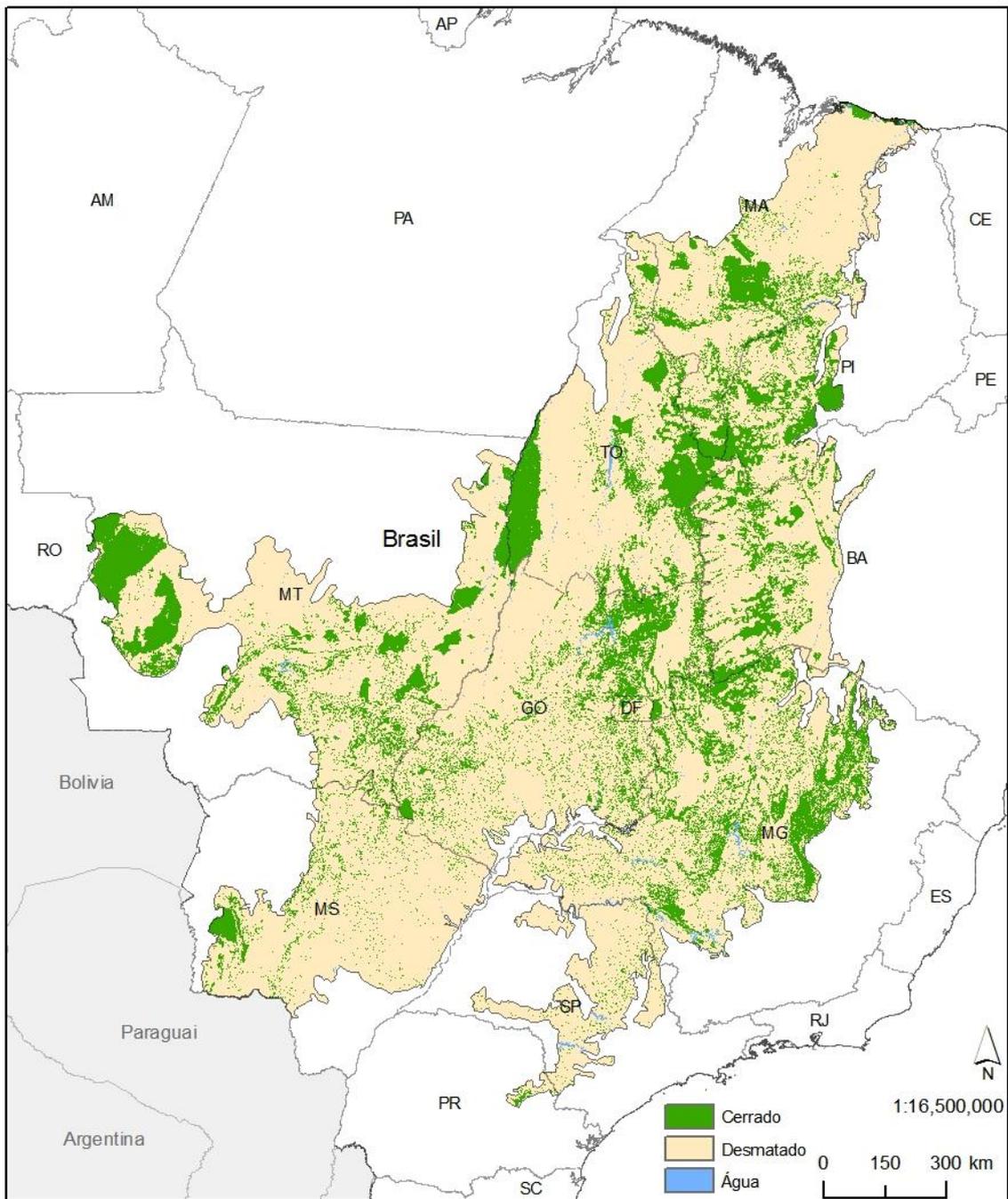


Figura 27 - BAU 2050



**Figura 28 - BAU 2060**

O Cenário de Intensificação do Desmatamento – ID, com a taxa de desmatamento duplicada em relação ao cenário anterior, teve como consequência a conversão de todos os pixels de cerrado para desmatado ao final de 2060 (Figuras 29 a 33).

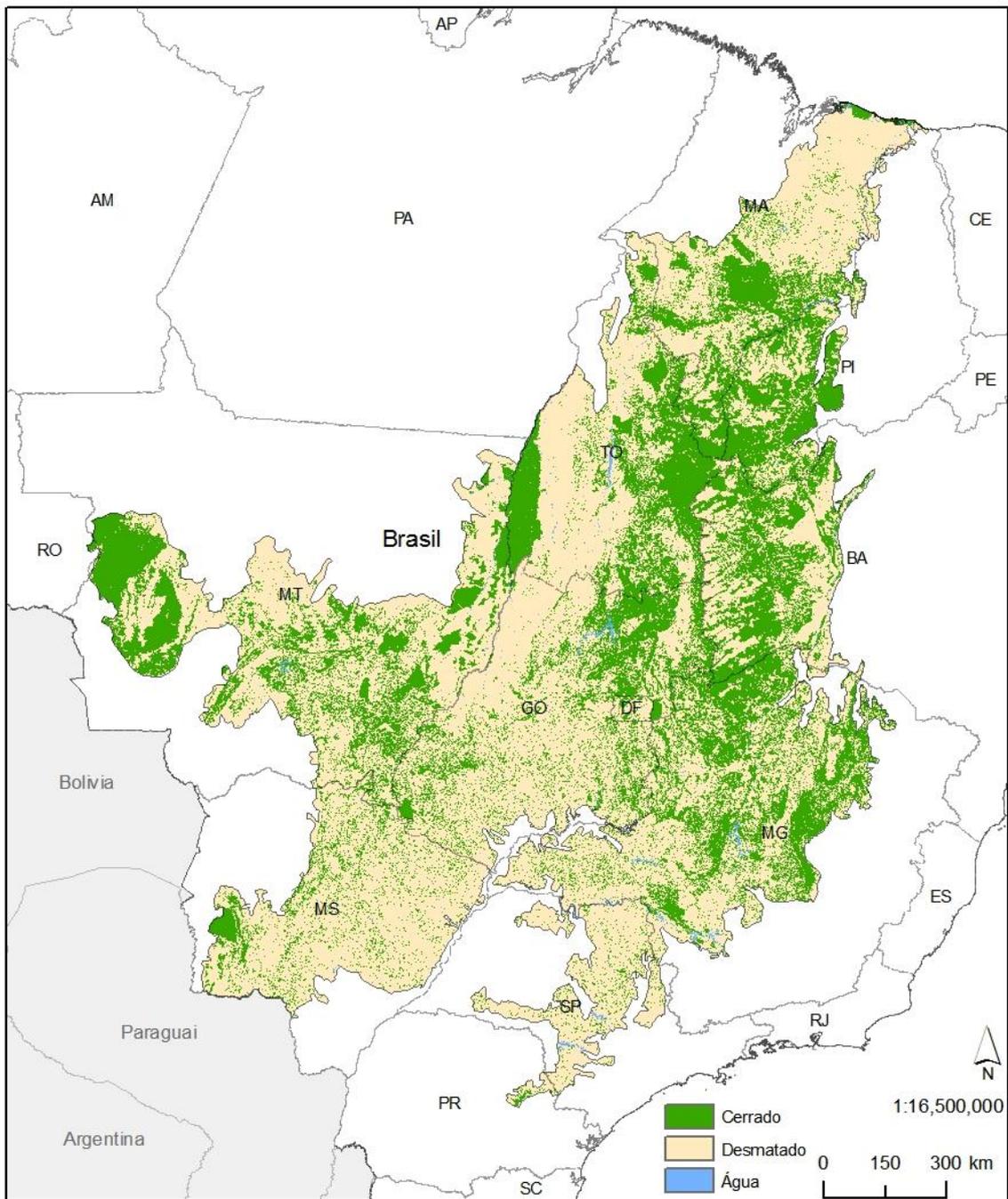


Figura 29 - ID 2020

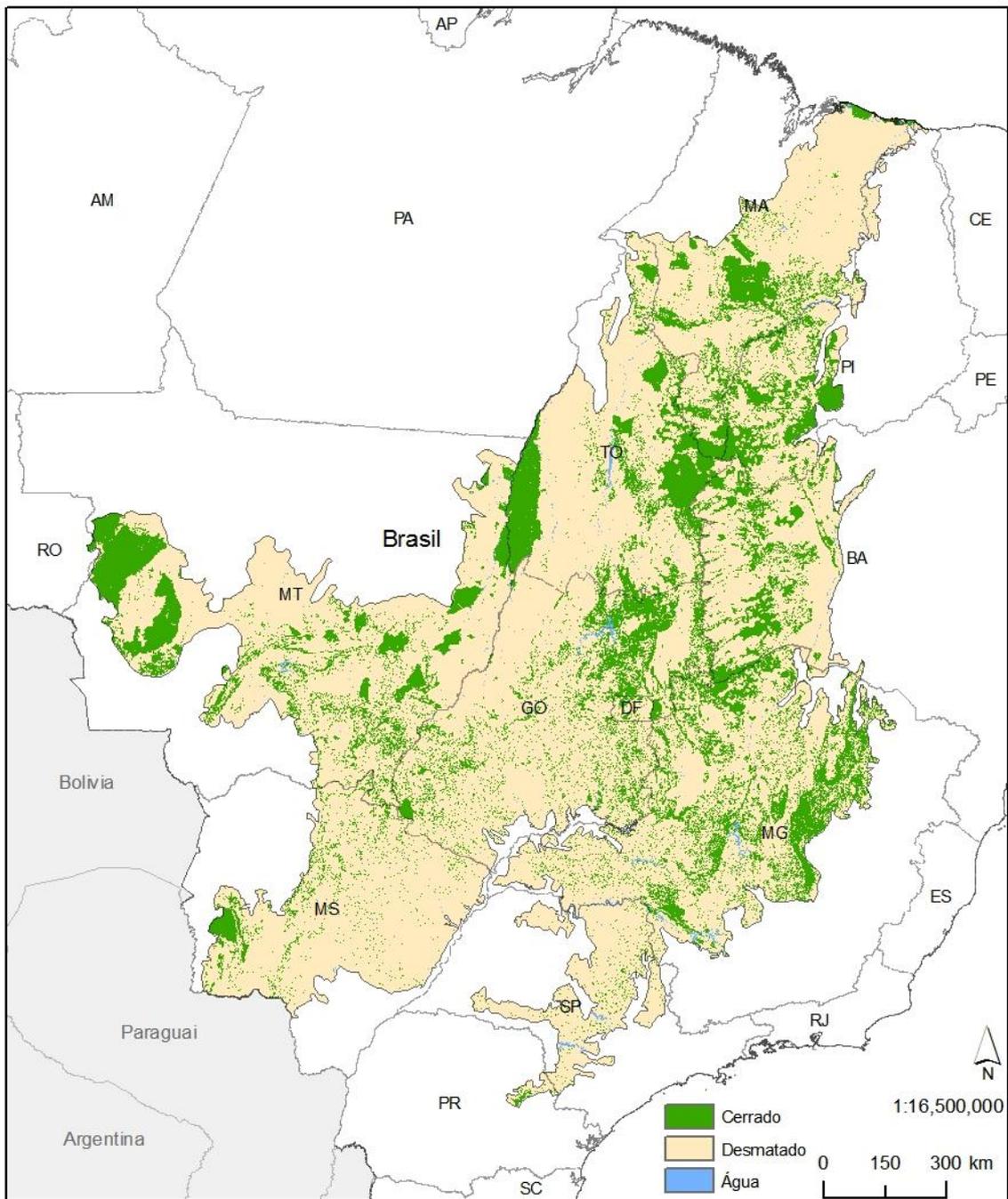


Figura 30 - ID 2030

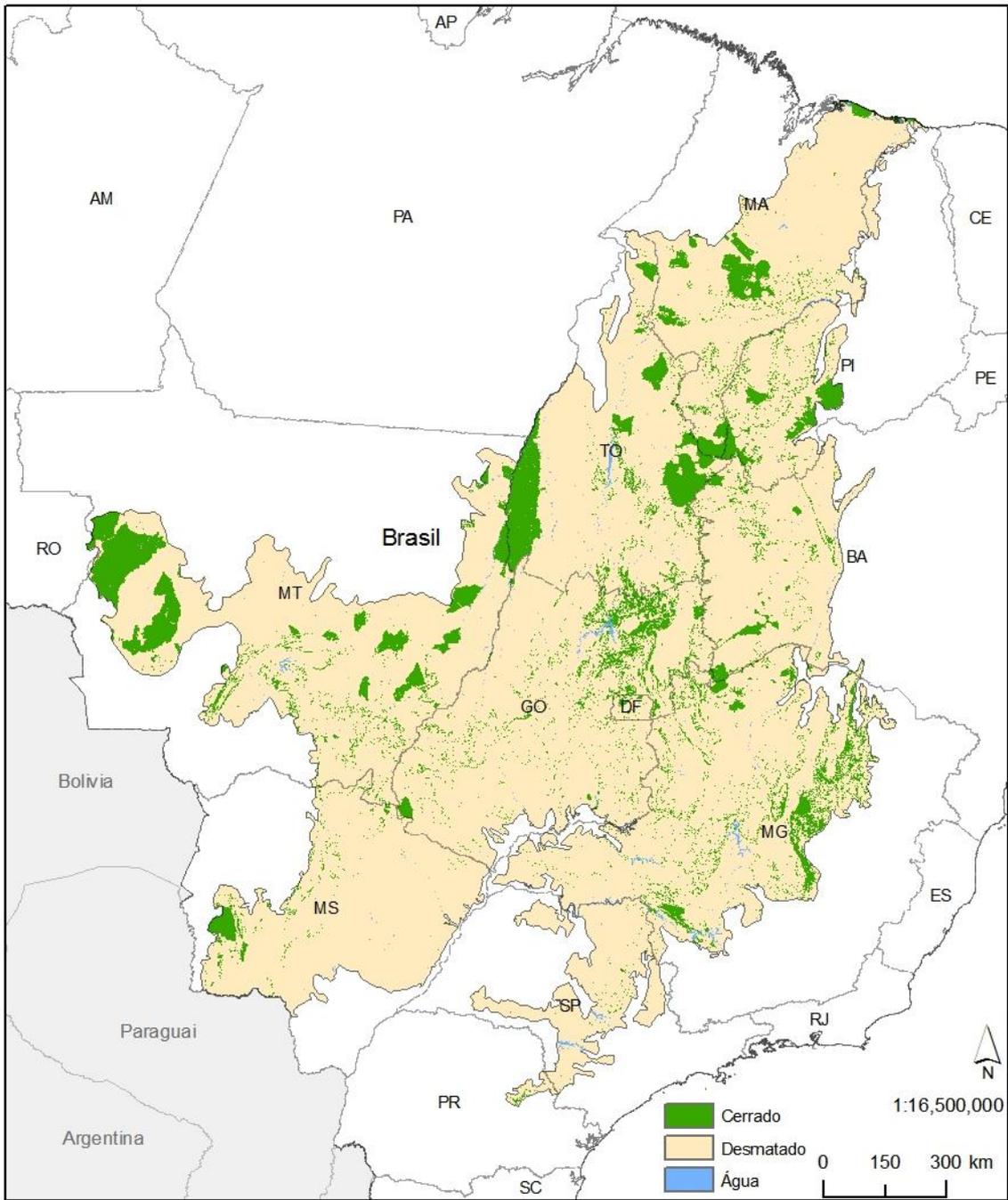


Figura 31 - ID 2040

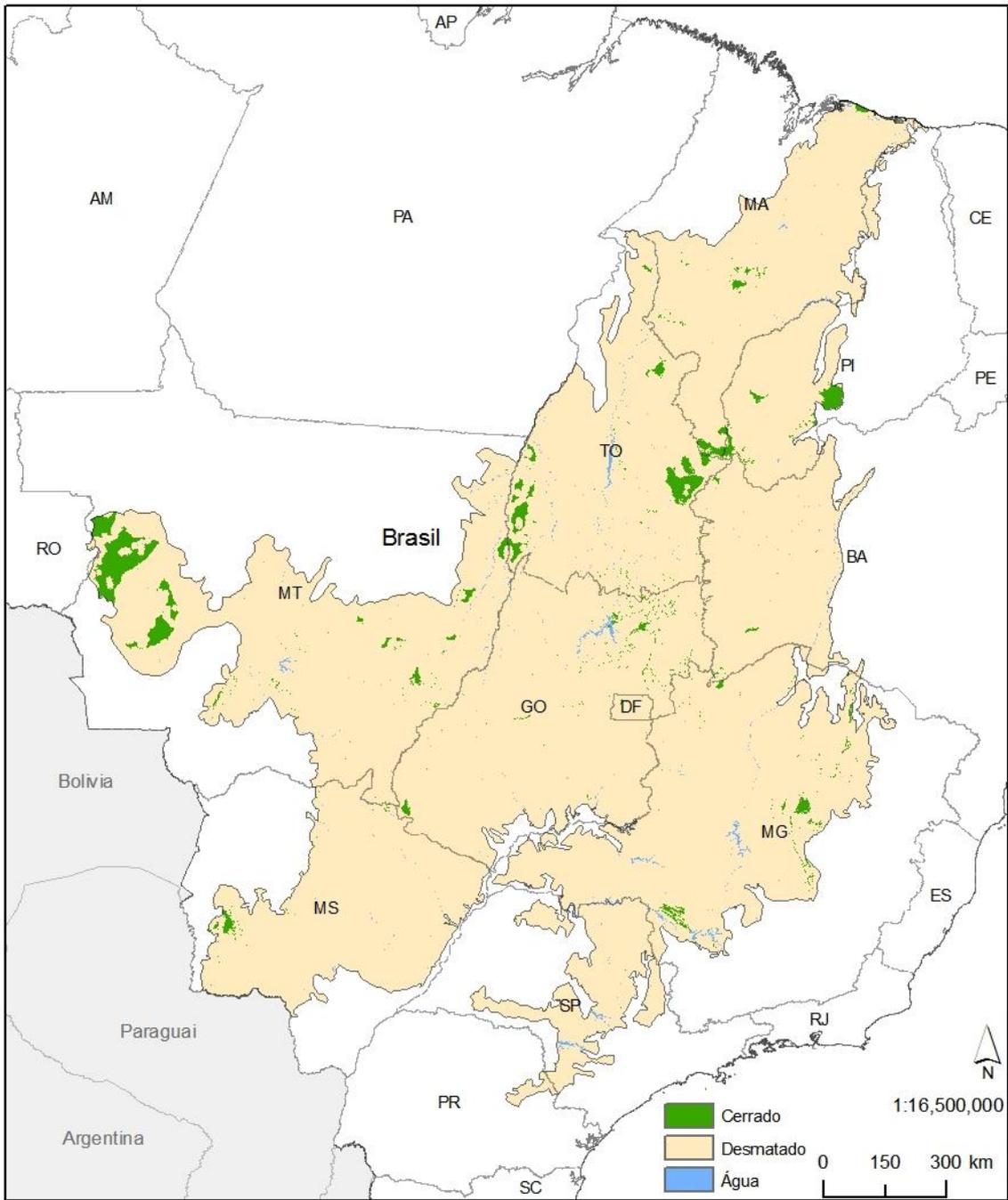
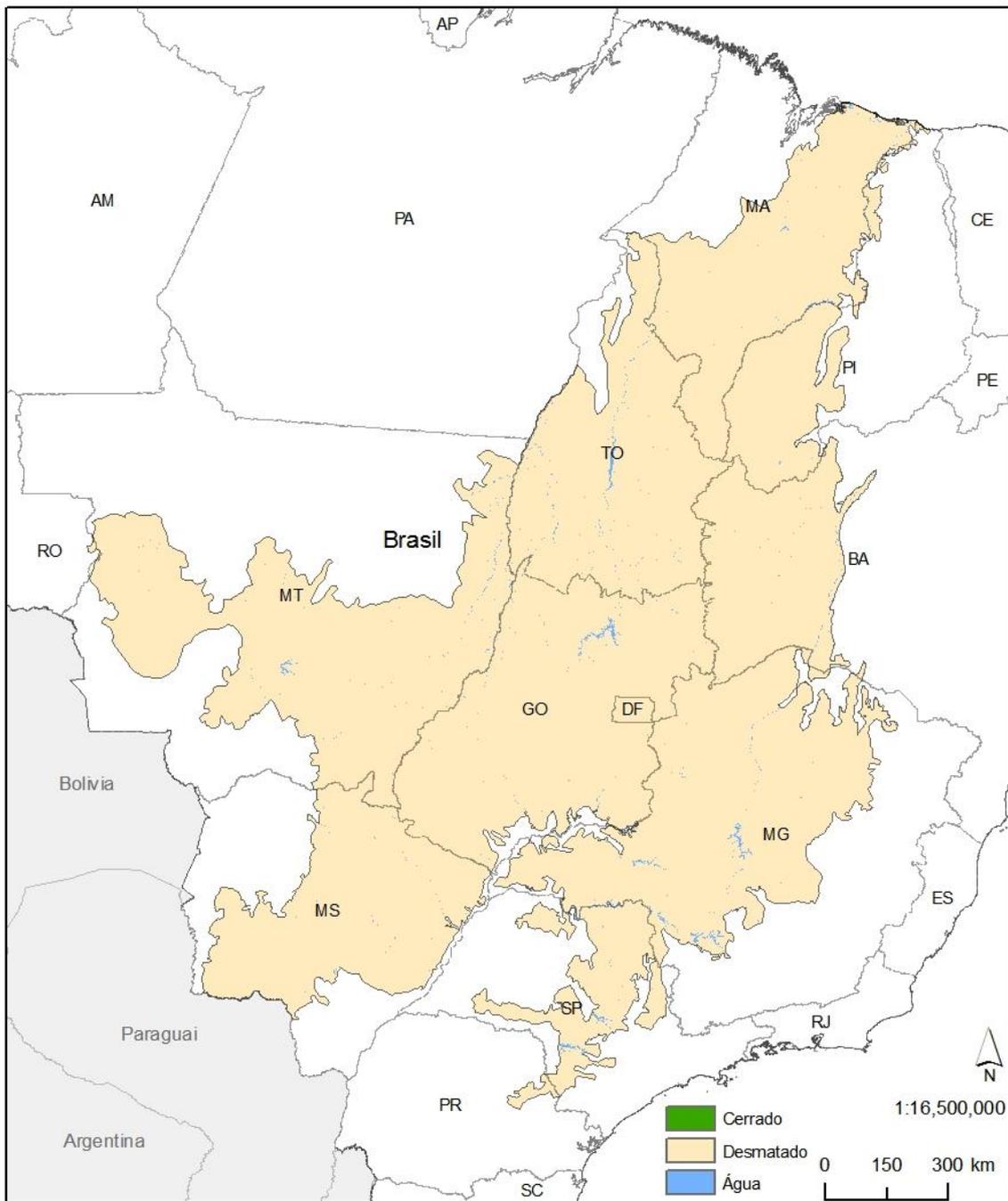


Figura 32 - ID 2050



**Figura 33 - ID 2060**

O Cenário de Implementação de Políticas Conservacionistas – IPC, que implementa restrições ao desmatamento em Unidades de Conservação de Proteção Integral, Unidades de Conservação de Uso Sustentável, Terras Indígenas e Áreas prioritárias à Conservação, garantiu a preservação 22,4% até o final de 2060 (Figuras 34 a 38), o mesmo percentual do cenário BAU, já que a cadeia de Markov contou com mesmos valores, fazendo que desmatamentos que ocorreriam dentro das áreas especialmente protegidas ocorressem fora.

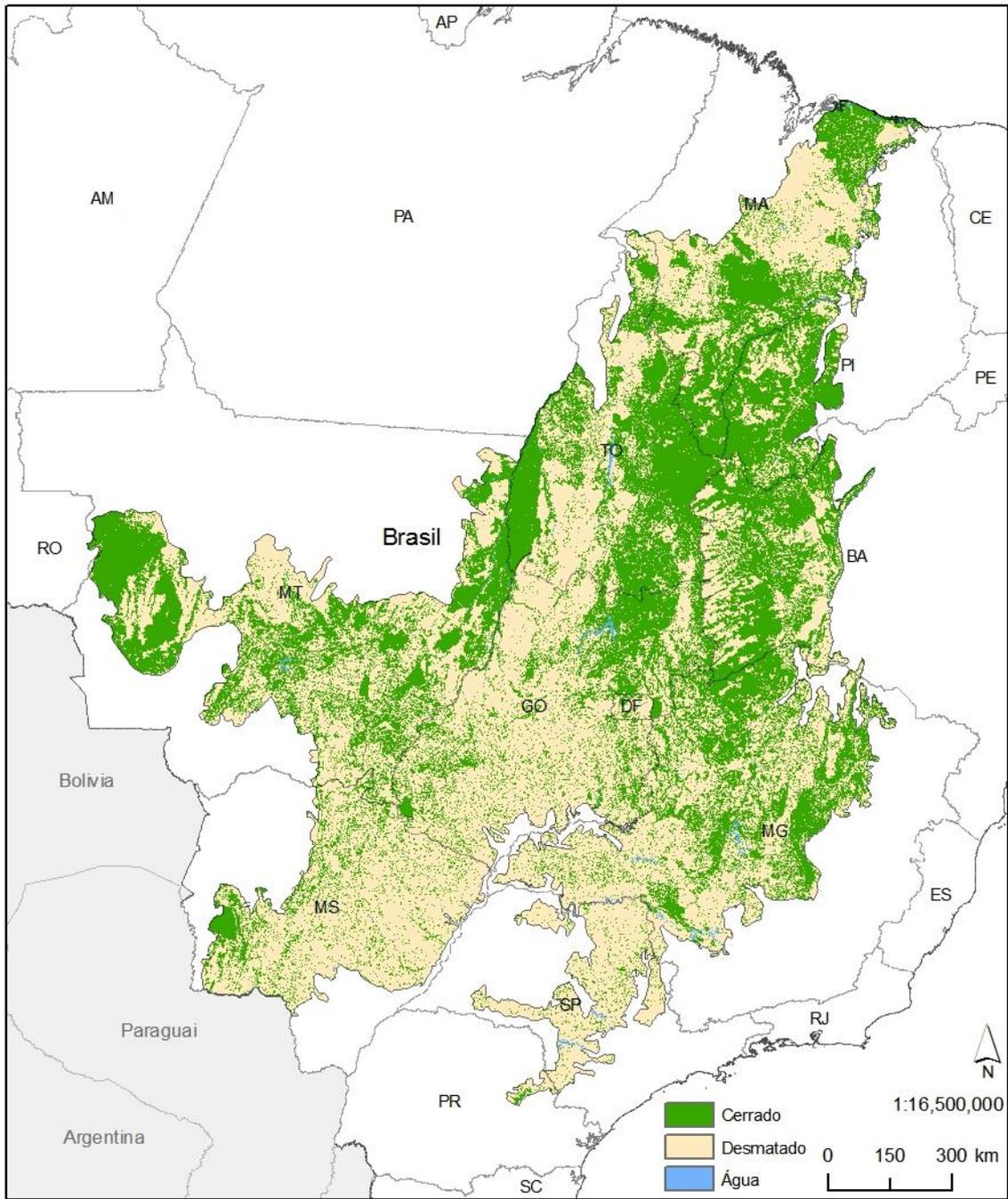


Figura 34 - IPC 2020

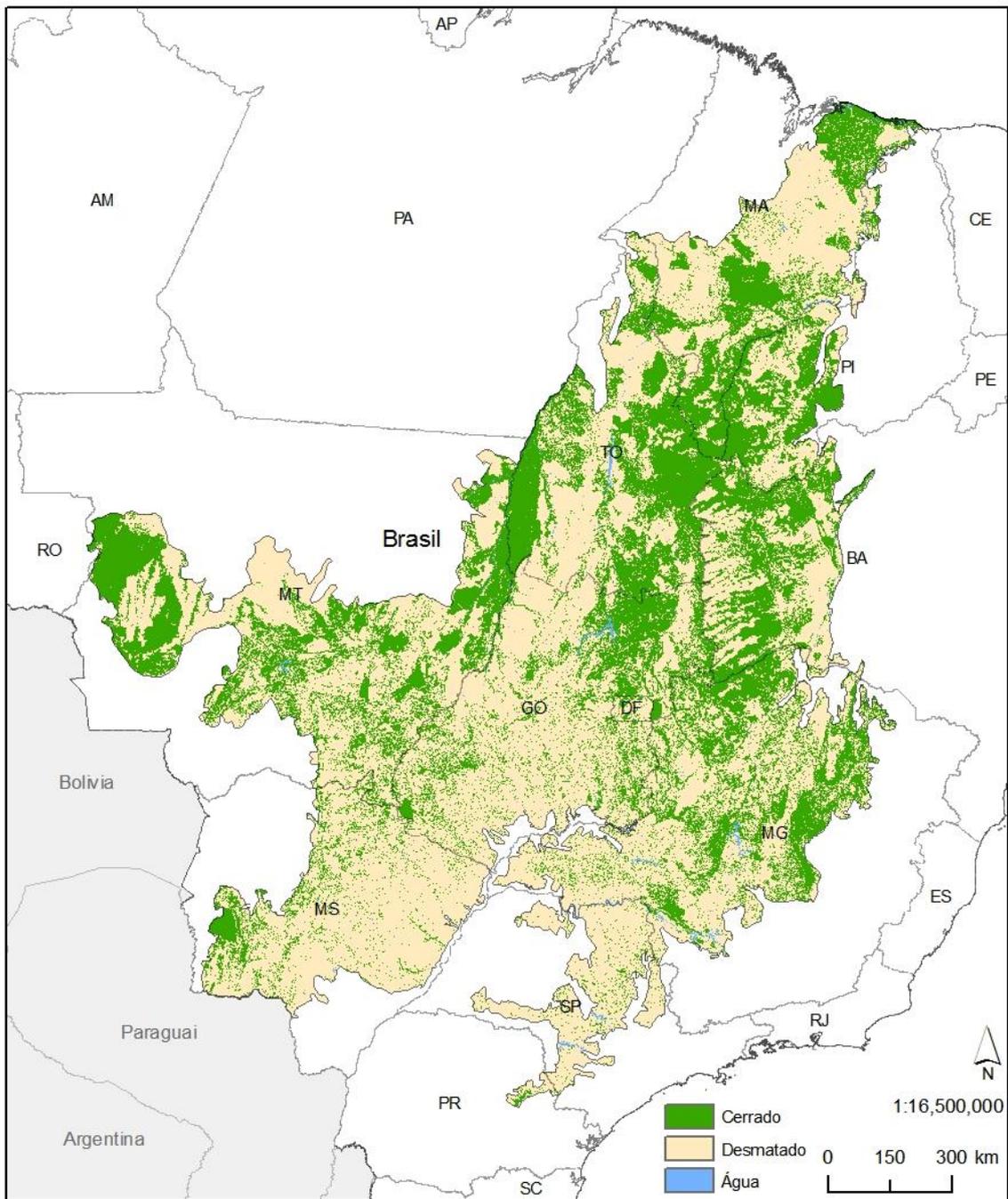


Figura 35 - IPC 2030

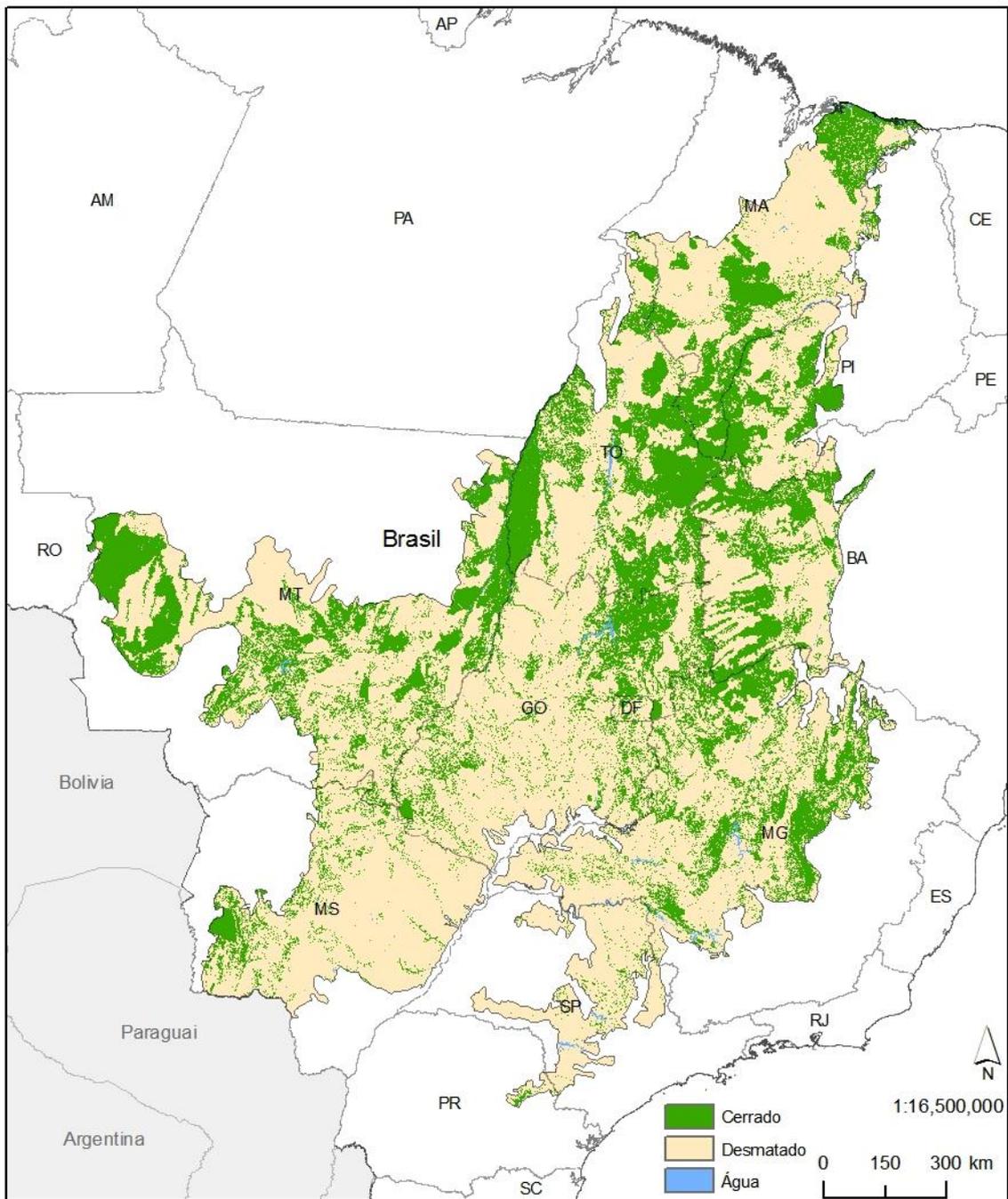
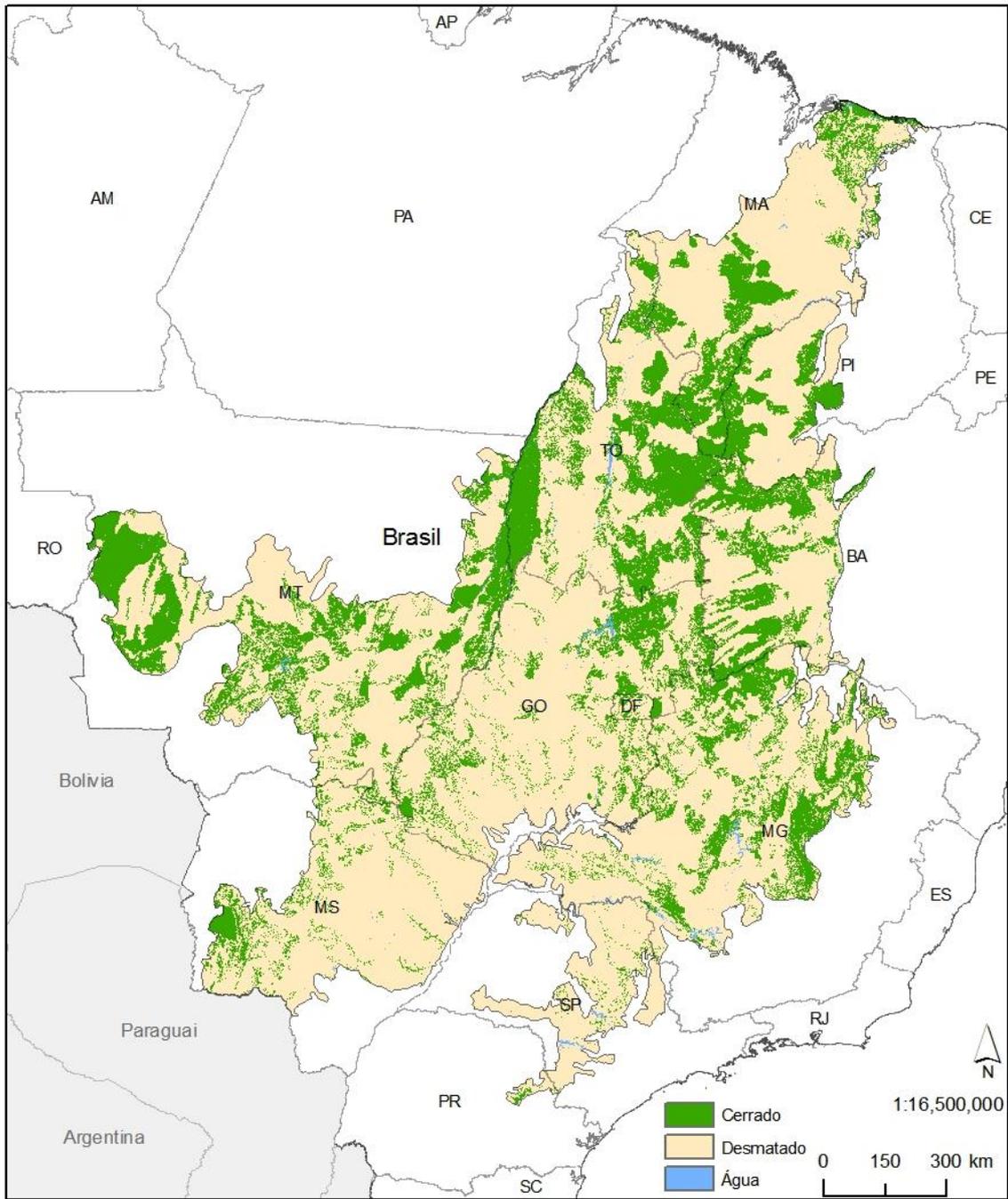
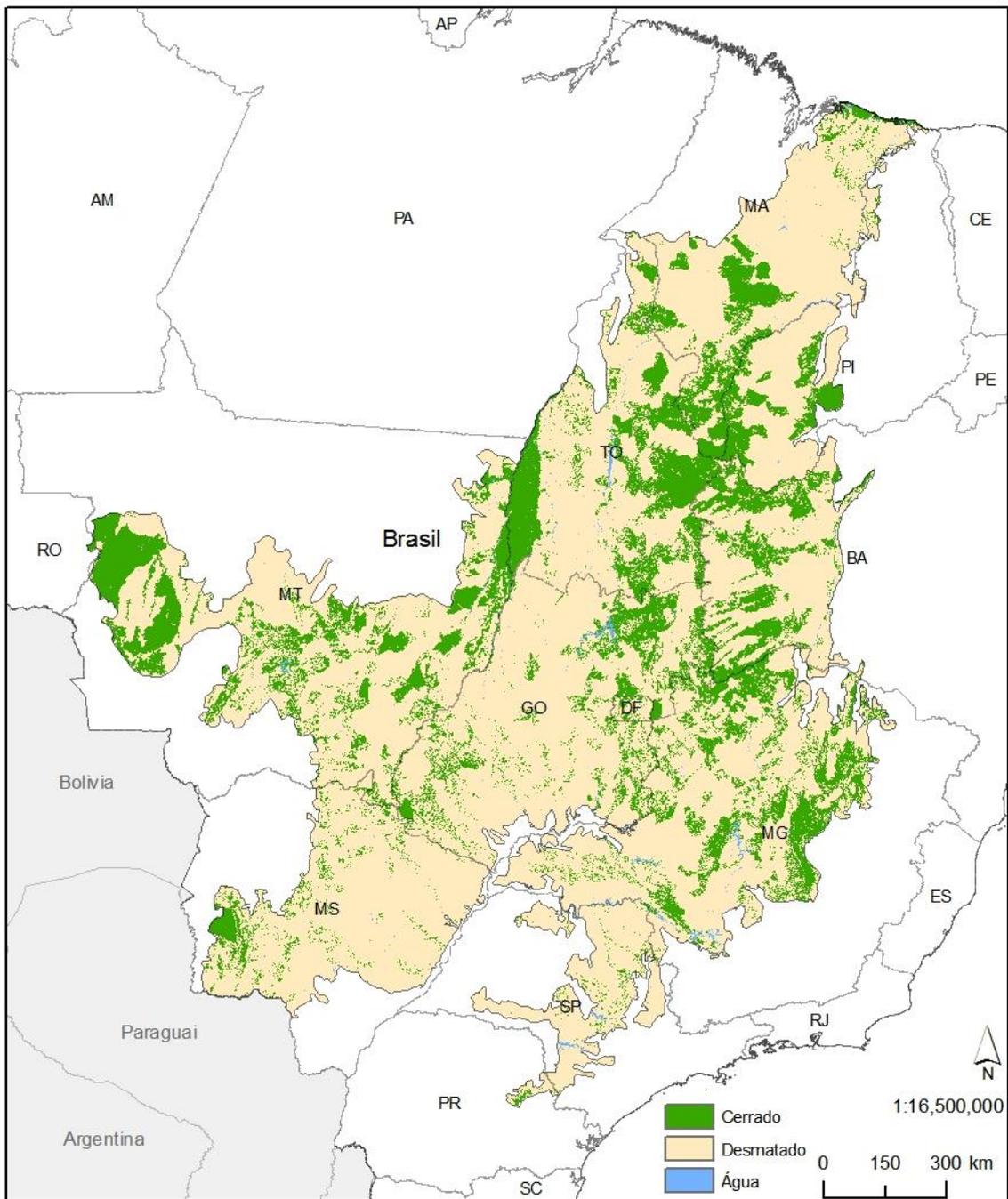


Figura 36 - IPC 2040

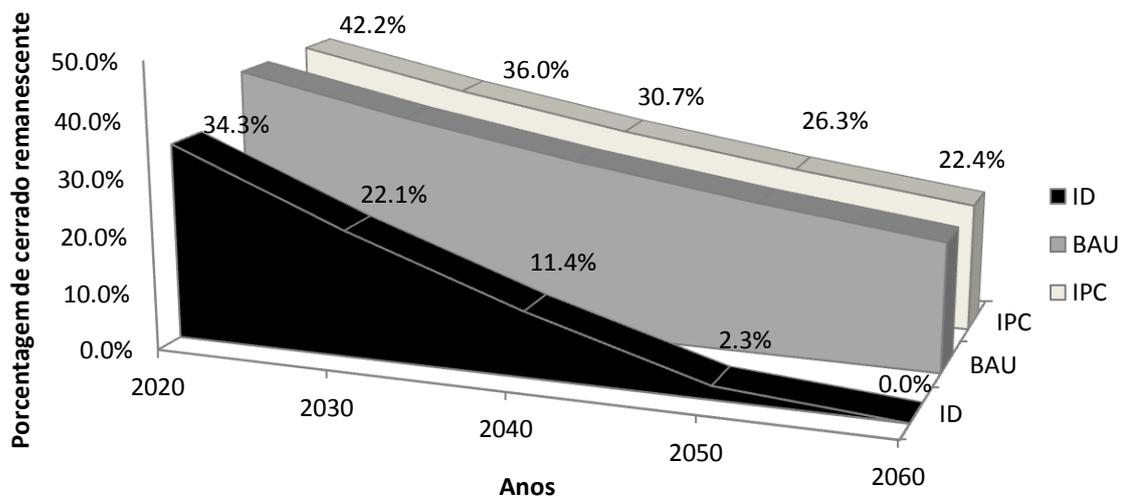


**Figura 37 - IPC 2050**



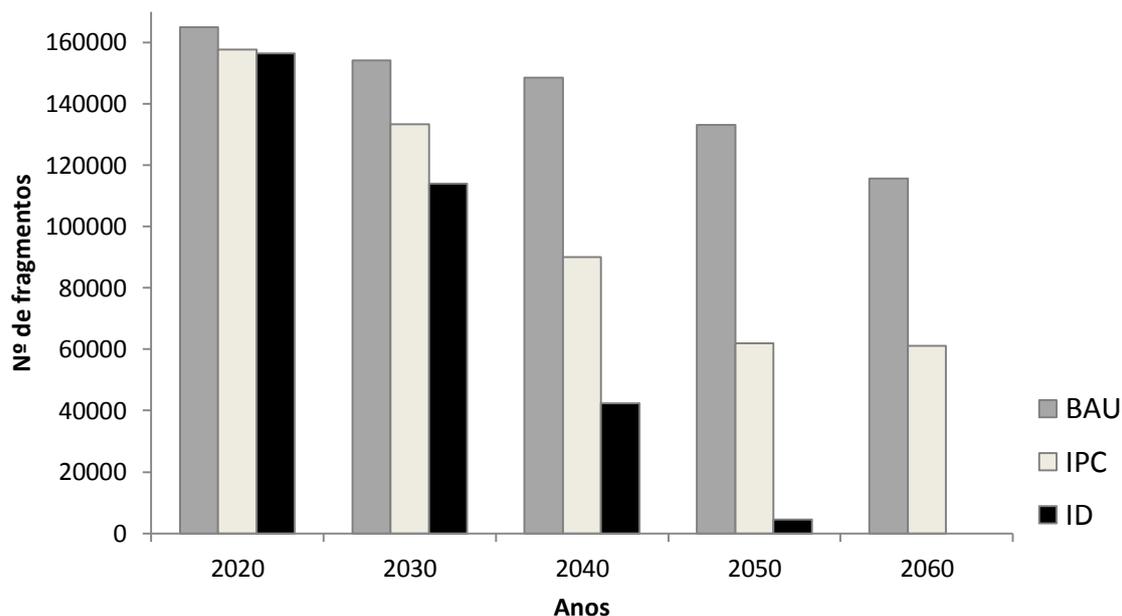
**Figura 38 - IPC 2060**

Ao observar os mapas, é evidente a diferença entre os cenários. Em valores absolutos os cenários BAU e IPC são idênticos, porém se diferenciam bastante em relação ao cenário ID (Figura 39).



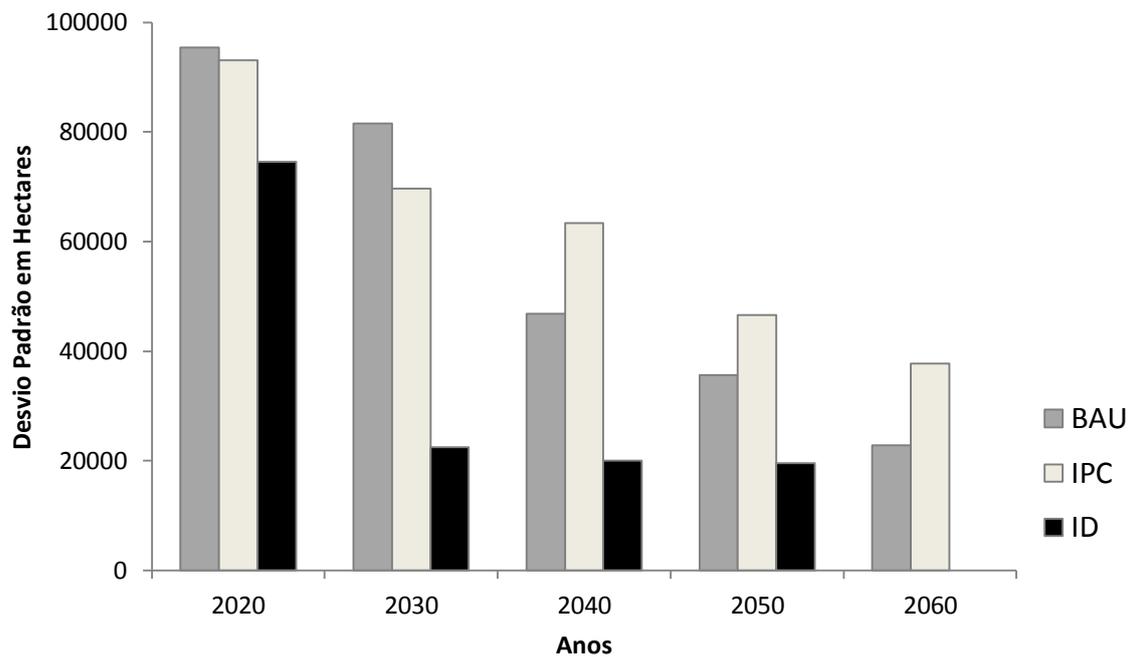
**Figura 39 - Projeção da proporção de Cerrado para os três cenários**

Contudo, os valores absolutos de remanescentes de Cerrado não refletem as diferenças entre os três cenários. O número de fragmentos é um primeiro indicador dessa diferença. O cenário BAU se mantém com o maior número de fragmentos em todos os períodos analisados. O IPC tem a segunda menor quantidade, ficando com praticamente a metade dos fragmentos do BAU nos últimos dois períodos, já que mantém fragmentos maiores. O cenário ID tem o menor número de fragmentos em todos os períodos, porém com quase a mesma quantidade de fragmentos que o IPC em 2020 e com nenhum fragmento em 2060 (Figura 40). Cabe também observar que o cenário BAU tem uma perda tênue de número de fragmentos em relação ao IPC. Isso é em grande parte devido a fato de que a maior parte dos fragmentos (pequenos, menores que mil hectares) estão fora das Áreas prioritárias, UC e TI e portanto mais vulneráveis ao desmatamento. Ou seja o cenário IPC prevê uma transferência dos possíveis desmatamentos nas áreas especialmente protegidas para as áreas não protegidas, para assim compensar a diminuição da taxa de desmatamento dessas áreas no restante do bioma, refletindo uma política de conservação localizada.



**Figura 40 - Número de fragmentos de cerrado**

Um elemento que coopera para o entendimento da variação do tamanho dos fragmentos em cada cenário é o desvio padrão. Em todos os três cenários, o desvio padrão diminui a cada período, porém no caso do cenário ID de 2030 a 2040, a diminuição é mínima. Também é notório que inicialmente o desvio padrão do cenário BAU é o maior, mas a partir de 2040, o desvio padrão do cenário IPC passa a ser maior que o BAU, o que indica uma maior amplitude no tamanho dos fragmentos no cenário BAU a partir de 2040 (Figura 41).



**Figura 41 - Desvio padrão do tamanho dos fragmentos remanescentes**

Durante os períodos, o cenário IPC obteve a maior média, com exceção de 2050, em que o cenário ID obteve média maior, já que continha pouquíssimos fragmentos em relação aos demais cenários, dentre eles fragmentos maiores (Figura 42). Isso significa que o cenário IPC mantém fragmentos maiores que os demais, já que esses estão em grande parte dentro das áreas especialmente protegidas.

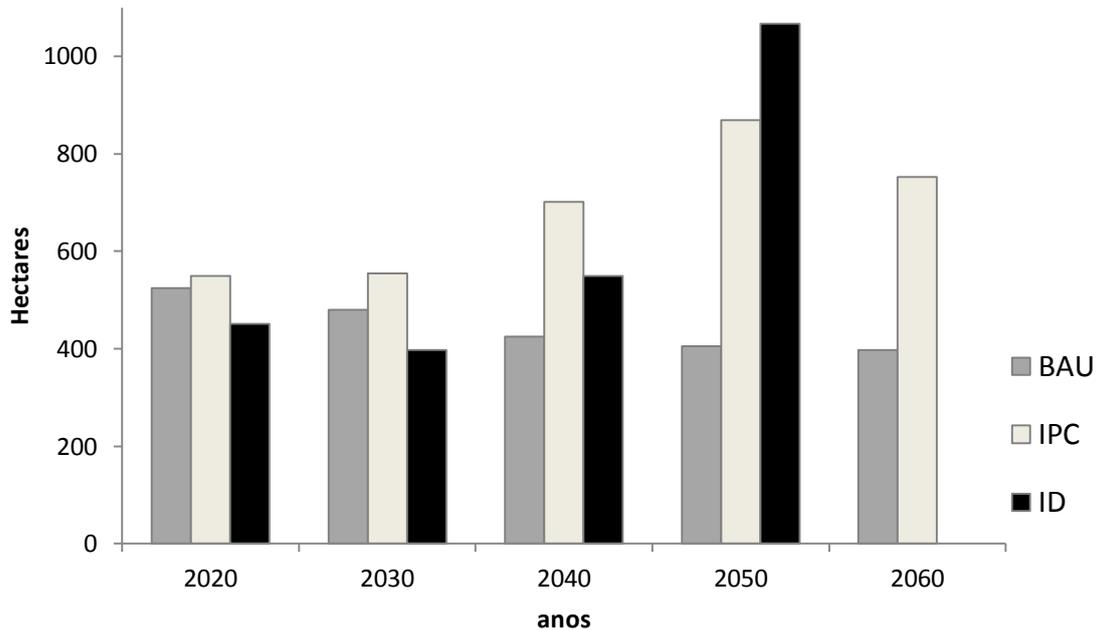
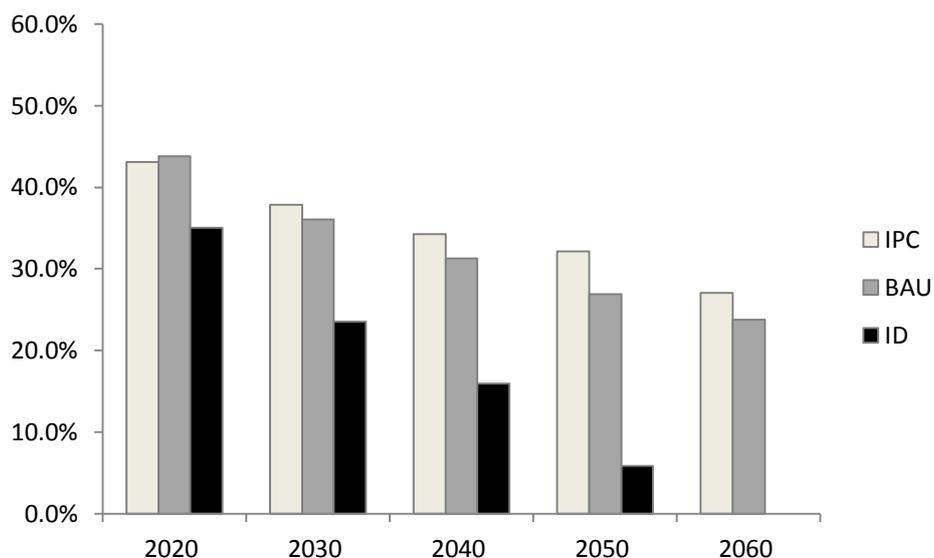


Figura 42 - Tamanho médio dos fragmentos remanescentes

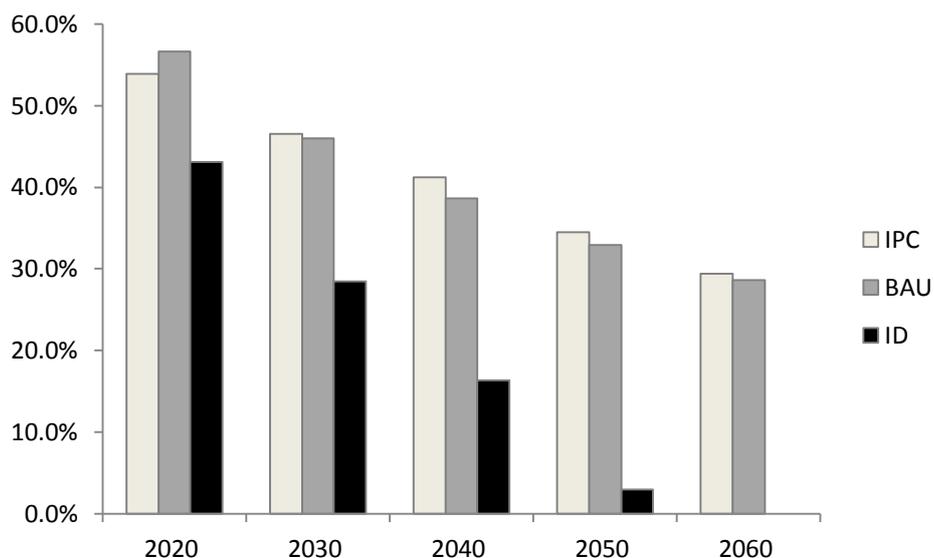
Complementarmente, o cálculo de porcentagem de remanescente de Cerrado por período em cada cenário e em cada Região Hidrográfica permitiu um entendimento mais regionalizado do avanço do desmatamento. No caso do agrupamento da Região Hidrográfica Amazônica e Paraguai, o cenário IPC preserva maior quantidade de áreas nativas em todos os períodos, com exceção do primeiro, em que o cenário BAU preserva pouco mais que o IPC. O cenário ID é o com menos área de cerrado em todos os períodos.

Esse agrupamento de Região Hidrográfica apresenta, em linhas gerais, duas características que cooperam para que o cenário IPC preserve mais cerrado que o BAU: tem grande parte dos seus remanescentes dentro das áreas definidas com *constraints*, com grande áreas de Terras Indígenas (Nambiwara, Enauwenê-Nawê, Utiariti e Paresi) e as áreas mais vulneráveis estão dentro das áreas prioritárias, que nesse cenário tem taxa menor de conversão, transferindo parte do desmatamento para áreas em outras bacias.



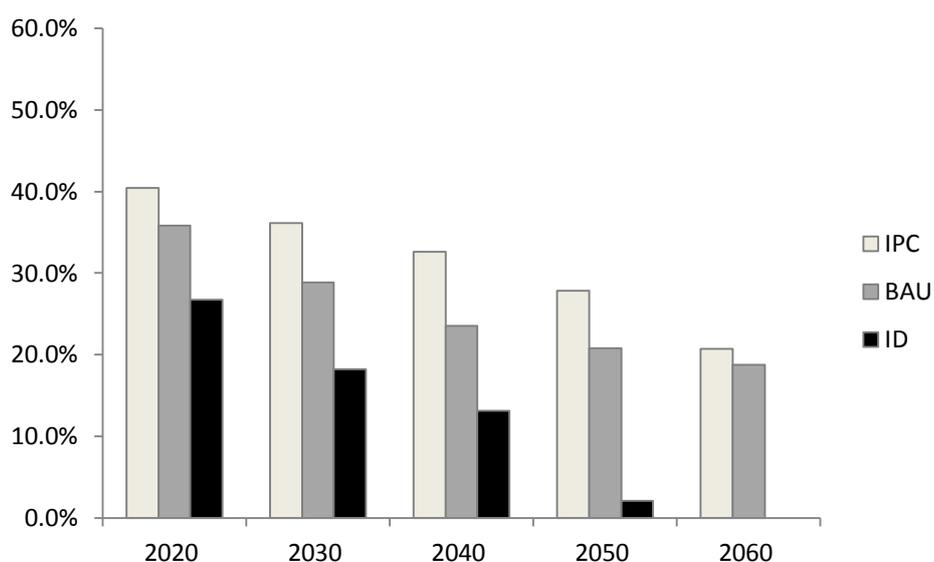
**Figura 43 - Porcentagem de cerrado nas Regiões Hidrográficas Amazônicas e Paraguaia**

Da mesma maneira que na Região Hidrográfica Amazônica e Paraguaia, na Região Hidrográfica do Tocantins a proporção de remanescentes de cerrado no primeiro período é maior no cenário BAU e nos demais períodos IPC. Isso porque as áreas mais suscetíveis ao desmatamento estão em boa parte cobertas por áreas prioritárias e partes dos grandes blocos de cerrado estão protegidos por UC de Proteção Integral, tais como, Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins, Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros, TI Kraolandia e TI Xerente. Contudo essas áreas totalmente protegidas no cenário IPC representam uma área proporcionalmente menor da R.H Tocantins do que as da R.H do Atlântico Nordeste Ocidental e Parnaíba. Por isso a área de remanescente do cenário BAU e IPC são praticamente iguais em 2060.



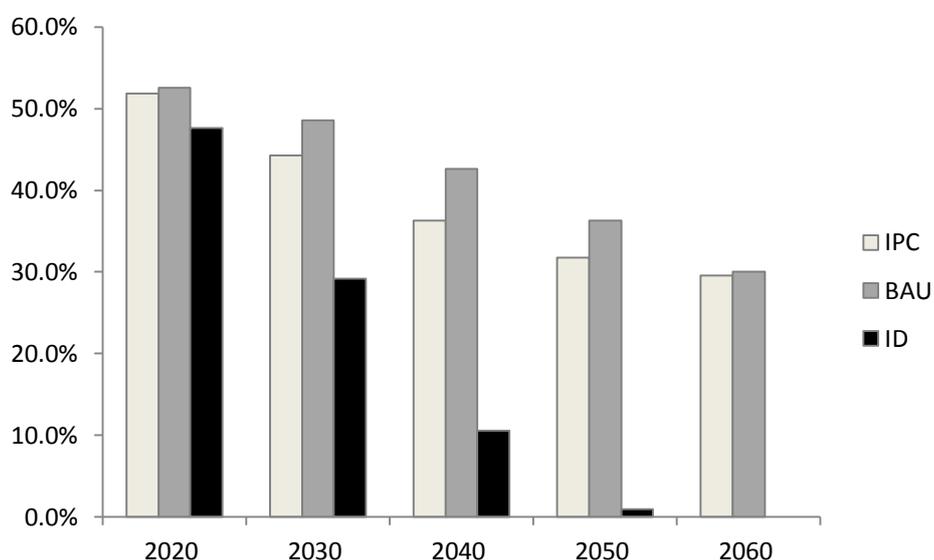
**Figura 44 - Porcentagem de Cerrado na Região Hidrográfica Tocantins**

Na Região Hidrográfica Araguaia, em todos os anos, o cenário IPC manteve mais cerrado, no último período quase sendo igualado pelo cenário BAU. Já o cenário ID teve sua porção de cerrado suprimida a uma alta taxa, aproximadamente 5% por década. Por mais que o *constraints* do cenário IPC, nas áreas prioritárias, retarde o desmatamento, o efeito em 2060 é bastante similar ao do BAU. A área a mais protegida no cenário IPC em relação ao BAU está concentrada nas bordas dos fragmentos no médio Araguaia, no município de Cocalinho, Ribeirão Cascalheira e mais ao norte, nos municípios de Luciára e São Felix do Araguaia.



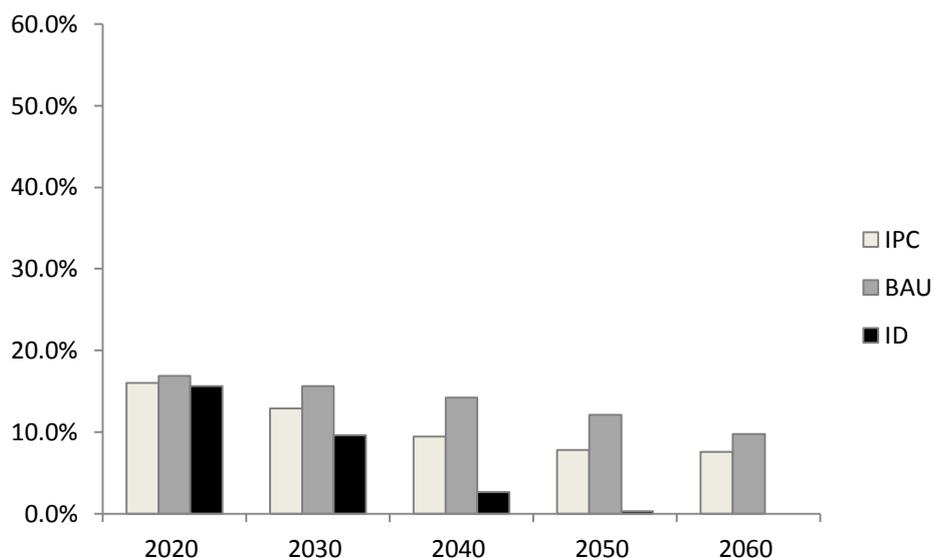
**Figura 45 - Porcentagem de cerrado na Região Hidrográfica Araguaia**

Na Região Hidrográfica São Francisco e Atlântico Leste, o cenário BAU manteve mais remanescentes que as demais em todos os períodos, com pouca diferença do cenário IPC no primeiro e último períodos. Apesar de inicialmente o cenário ID ter um montante de Cerrado próximo dos demais, nos períodos seguintes, a diferença aumenta substancialmente. Os *constraints* tiveram efeito considerável na contenção do desmatamento na região. Contudo o aumento da taxa de desmatamento fora dos *constraints*, em compensação à diminuição da taxa de desmatamento dentro deles, teve efeito dentro da própria R.H. Por isso os cenários IPC e BAU tiveram praticamente a mesma área de remanescentes de cerrado em 2060.



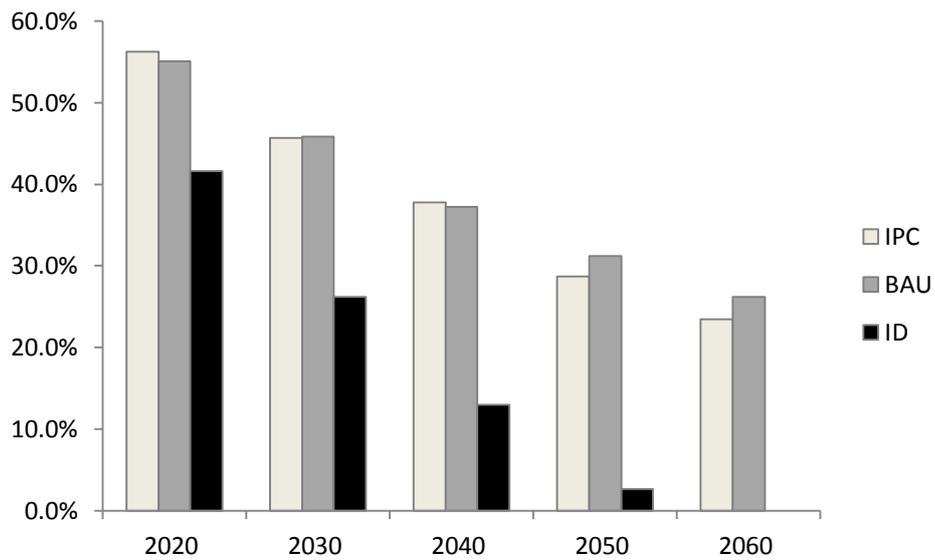
**Figura 46 - Porcentagem de cerrado na Região Hidrográfica São Francisco e Atlântico Leste**

Enquanto que nos demais limites a porcentagem de Cerrado inicial é entre 40% e 60%, na região hidrográfica do Paraná os remanescentes estão em torno de 15% em todos os cenários no primeiro período. Nos demais períodos, o cenário BAU mantém maior quantidade de cerrado, seguido do cenário IPC. Por essa R.H. ter pouquíssimas UC e TI e os fragmentos remanescentes serem altamente vulneráveis ao desmatamento (ver figura 19), quando há o aumento da taxa de desmatamento fora dos *constraints* (no cenário IPC), praticamente todos esses pequenos fragmentos são desmatados até 2060. Dessa forma, o cenário BAU chega a 2060 com maior área remanescente de cerrado do que o IPC, apesar do IPC preservar áreas mais contínuas ou fragmentos mais próximos.



**Figura 47 - Porcentagem de cerrado na Região Hidrográfica Paraná**

Inicialmente, o cenário IPC mantem mais cerrado que os demais na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental e Parnaíba, contudo, o cenário BAU passa a ter mais cerrado nos períodos de 2050 e 2060. Já o cenário ID, que inicia com aproximadamente 40% de cerrado, chega a 2050 com cerca de 3% e a 2060 sem registro de Cerrado. Com exceção da região norte maranhense, os *constraints* estão, em grande parte, localizados em áreas de baixa probabilidade de desmatamento, tais como Chapadas do Alto Itapecuru e Parque Nacional do Rio Parnaíba. Isso faz com que os *constraints* tenham menor efeito na contenção de desmatamento e não compensem o aumento da taxa fora dos *constraints*. Assim o cenário BAU em 2060 mantem maior área que o IPC, apesar do IPC manter grandes áreas concentras ao sul da R.H.



**Figura 48 - Atlântico Nordeste Ocidental e Parnaíba**

## 4. DISCUSSÃO

A produção agropecuária contribui de maneira substancial na balança comercial brasileira, cerca de 171,1 bilhões, 5,8% do PIB (Produto Interno Bruto) de 2010 (IPEA, 2010), e vem de uma crescente desde 2004; em contrapartida, os serviços ecossistêmicos essenciais à vida e à produção agropecuária não são computados nesse cálculo, nem mesmo subtraídos quando se trata de área de cerrado desmatado. Isso traz questionamentos sobre os reais benefícios envolvidos no aumento da produção agrícola. De qualquer forma, o cenário atual aponta para a expansão da área antropizada no Cerrado, contudo, não se sabe ao certo em que proporção essa ocupação se intensificará. Por isso, o presente estudo se mostra pertinente, permitindo indicar cenários futuros baseados em diferentes conduções da ocupação do bioma.

Fato é que o fenômeno do desmatamento é o principal causador de extinção (TISCHENDORF e FAHRING, 2000), tem consideráveis impactos sobre a ciclagem de nutrientes do solo, regulação do clima, diminuição do fluxo basal dos corpos d'água, causa perdas significativas na capacidade de polinização, reduz o campo de descobertas farmacológicas entre outras perdas. Portanto é um fenômeno que merece atenção política e científica, além de ser discutido com a sociedade como um todo.

Até então as ações de conservação no Cerrado tem se mostrado limitadas quanto à capacidade de moldar paisagens que preservam suas principais funções ecossistêmicas e sejam, ao mesmo tempo, produtivas. Em grande parte, isso se deve a dificuldades de fiscalizar o cumprimento da manutenção das RL e da APP e a limitada capacidade do Estado em criar e manter UC em áreas de relevante importância biológica. É difícil observar UC em áreas de alto interesse econômico por mais que tenham grande valor biológico. Em muitos casos as UC não são estabelecidas nos locais de maior interesse ambiental, e sim onde os interesses econômicos permitem. Uma exceção emblemática é o Parque Nacional das Emas. Parte das consequências disso estão expressas nos cenários BAU e ID, onde áreas importantes a conservação da biodiversidade foram suprimidas.

No entanto, o presente modelo, como os demais, é uma representação da realidade, (HAGGETT e CHORLEY, 1967) com várias de limitações e abstrações. As variáveis inicialmente selecionadas representam uma pequena porção de um vasto leque de variáveis

relacionadas ao desmatamento no Cerrado, e mesmo as variáveis selecionadas e incluídas no modelo são restritas à escala e ao método de coleta dos dados, por exemplo, os dados de uso do solo não observam áreas desmatadas nos períodos anteriores, inviabilizando mapear áreas regeneradas (CSR/IBAMA, 2011b), o dado de solos, não apresenta o nível de detalhe (escala) ideal para o trabalho.

Esses aspectos de limitação, tanto das variáveis quanto do modelo, fazem dos resultados de trabalho um objeto a ser analisado com atenção e aprimorado em posteriores pesquisas.

Além das questões relacionadas às variáveis, há também a questão da abrangência da área de estudo, já que o Cerrado é maior que o territórios da França e da Espanha juntas. Para abranger tal extensão, a unidade de análise (pixel) foi equivalente a 25 hectares (500mx500m), o que implicou na reamostragem das variáveis, ora para aumentar o tamanho do pixel, ora para diminuí-lo. Esse tamanho de pixel foi condição para viabilizar os processamentos, uma limitação de hardware. Uma alternativa é que em estudos futuros sejam feitos modelos regionais, utilizando os dados em escalas mais refinadas (VELDKAMP e LAMBIN, 2001).

Ainda sobre as limitações relacionadas às variáveis, apesar de muitas vezes ser importante incorporar variáveis econômicas (TUNER II, SKOLE, *et al.*, 1995), por vezes isso se torna complexo, mais do que isso, difícil de avaliar o peso que essas variáveis têm sobre o modelo. E no caso do Cerrado, isso aparentemente tem um valor significativo, já que em algumas esferas ele é entendido como “celeiro do mundo” (CHAVEIRO e BARREIRA, 2010), suscetível à balança comercial e ao valor das *commodities*. Apesar do agronegócio não representar mais que 25% do PIB do agropecuário brasileiro em 2010 (CEPEA, 2011). Por essas limitações, os mapas resultantes devem ser pensados como mapas indicadores.

Entretanto, tanto a taxa de acurácia do LCM IDRISI Taiga (EASTMAN, 2009), de 77%, quanto à validação do modelo demonstram a robustez da proposta, com diferentes níveis de acerto entre as regiões hidrográficas, sendo que apenas as regiões hidrográficas do Araguaia e do A.N Ocidental e Parnaíba tiveram acerto geral  $M(m)$  menor 0,99 na resolução inicial, um desempenho bastante superior ao do modelo nulo. No caso do indicador  $P(m)$ , o acerto do modelo na escala inicial ficou variando em torno de 0,99 e o modelo nulo, 0,93. Ambos se mantendo inalterados nas diferentes resoluções, o que

demonstra a pouca quantidade de erro na estimativa de área desmatada, algo pouco comum, já que o esperado é que o modelo nulo tenha maior acerto em P(m) nas resoluções mais finas, enquanto o modelo propriamente dito melhora seu acerto à medida que se aumenta o tamanho do pixel (PONTIUS JR, HUFFAKER e DENMAN, 2004).

Quanto aos cenários, não devem ser lidos como profecias, mas como indicadores de uma realidade possível, se mantidas determinadas tendências e variáveis. Quanto maior o período a ser projetado, maior tende a ser a incerteza da projeção, por causa do acúmulo de erro (incerteza) do modelo, ano após ano, além do surgimento de políticas que interfiram na mudança do uso do solo, tais como o novo código florestal (Lei 12.651). Cabe lembrar que os dados de uso do solo que subsidiaram esse estudo representam a realidade do ano do respectivo mapeamento, portanto não englobam os efeitos do novo Código, que foi promulgado em 2012. Há pesquisadores que veem nessa nova lei uma grande probabilidade de aumento do desmatamento, tendo em vista a desobrigação de diversas propriedades em manter uma porção das Áreas de Preservação Permanente e Reservas Legais. Outros pensam que com a implementação do Cadastro Ambiental Rural, obrigatoriedade da nova lei, os desmatamentos ilegais irão diminuir. Fato é que o novo Código Florestal é mais permissivo na ocupação do uso do solo, apesar de trazer ferramentas de controle como o Cadastro, fazendo do cenário BAU um cenário conservador. Contudo, ainda é incerto o efeito dessa lei na paisagem, no caso no Cerrado. De qualquer forma, foram elaborados três cenários, que podem, de certa maneira, incluir parte desse futuro incerto.

Nos cenários projetados para 2060, o desmatamento avança principalmente pelas áreas próximas aos desmatamentos já ocorridos, em áreas planas e próximas a rodovias. No cenário BAU, são mais evidentemente notados os desmatamentos ocorridos no extremo norte do Cerrado, na região de Mata de Cocais no estado do Maranhão; na bacia do Tocantins, o desmatamento avança rapidamente em direção ao Araguaia parando no Parque homônimo; na Bahia, o cerrado perde espaço de forma acelerada não só no chapadão do Oeste da Bahia, mas também no entorno das cidades no mesmo meridiano de Serra Dourada; a porção cerradense do Mato Grosso perde vastas áreas, mantendo apenas as Terras Indígenas e pequenos fragmentos em áreas declivosas; em Goiás o desmatamento da bacia do Araguaia avança tal qual no Tocantins, além disso, há perdas de cerrado no nordeste do estado, os já pequenos fragmentos ao sul do estado se escasseiam ainda mais, preservando continuamente apenas o Parque Nacional de Emas e o da Serra de Caldas

Novas, no centro do estado ficam pequenos fragmentos dentro do Parque Estadual dos Pireneus e Serra do Catingueiro, ao norte praticamente só restam fragmentos grandes no entorno do Parque da Chapada dos Veadeiros; a porção mineira do Cerrado que inicialmente só não mantinha fragmentos médios e grandes ao sul do Parque Nacional da Canastra, em 2060 mantém apenas fragmentos nas áreas mais declivosas e de maiores altitudes como na Serra do Espinhaço; São Paulo e o Paraná que em 2010 já tinham pouquíssimos e pequenos fragmentos de cerrado, no último período modelado perdem quase que a totalidade dos remanescentes, com exceção de fragmentos às margens do rio Moji-Guaçu em São Paulo e no Paraná entre as cidades de Pirai do Sul e Tibagi; o Distrito Federal mantém apenas suas maiores Unidades de Proteção Integral (Parque Nacional, Estação Ecológica de Águas Emendadas, Estação Ecológica do IBGE) além de fragmentos na Serra da Cafuringa; o Mato Grosso do Sul, que inicialmente tinha uma das paisagens mais fragmentadas, preserva até 2060 praticamente apenas as porções dentro da Terra Indígena Kadiwéu e Parque Nacional da Bodoquena.

O cenário ID chega a 2060 sem nenhum fragmento, porém se analisarmos os últimos fragmentos a serem desmatados, em 2050, é possível distinguir as tendências regionais. No Maranhão restam pequenos remanescentes nas cabeceiras dos rios Alpercatas, Pau Grosso e Riacho Fundo, principalmente no município de Fernando Falcão; no Piauí os blocos de Cerrado que se mantêm até 2050 estão dentro de UC, como Estação Ecológica de Uruçuí-Uma, Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba e Serra das Confusões, mesmo assim praticamente a metade da área das UC foi desmatada; no Tocantins, apenas a Estação Ecológica da Serra Geral do Tocantins, Parque Estadual do Tocantins e Parque do Araguaia mantiveram parte de seus remanescentes de Cerrado, além do entorno da cabeceira do Rio Uruçu, ao norte do estado; na Bahia, praticamente só restou até 2050 um pequeno remanescente de cerrado dentro do Refúgio de Vida Silvestre Veredas do Oeste da Bahia, a única UC de Proteção Integral exclusivamente Baiana nos domínios do Cerrado; em terras goianas ficaram as áreas núcleo do Parque Nacional das Emas e da Chapada dos Veadeiros, com poucos e pequenos fragmentos em meio à Área de Proteção Ambiental (APA) do Pouso Alto e nas porções declivosas a nordeste do estado; no Distrito Federal sobraram apenas fragmentos dentro do Parque Nacional de Brasília; em Minas as UC de Proteção Integral do Parque da Canastra, Parque Nacional das Sempre Vivas e Grande Sertão Veredas mantiveram alguns fragmentos; São Paulo e Paraná não mantiveram Cerrado até 2050; em Mato Grosso, a preservação ficou a cargo das Terras

Indígenas em todo o estado e do Parque da Chapada dos Guimarães; no caso do Mato Grosso do Sul, até 2050 foram preservadas praticamente apenas as porções dentro da Terra Indígena Kadiwéu e Parque Nacional da Bocaina, tal qual no cenário BAU, porém com fragmentos menores.

O cenário IPC, apesar de preservar a mesma quantidade de Cerrado que o cenário BAU, configura uma paisagem inteiramente diferente, mantendo grandes blocos de vegetação nativa e agrupamentos de fragmentos dentro de áreas prioritárias à conservação. Isso faria com que, no Maranhão, fossem mantidos, até 2060, fragmentos próximos aos Lençóis Maranhenses, como o Parque dos Lençóis Maranhenses, Parque Chapada das Mesas, e a região dos rios Itapicuru, Corda, Brejo do Curicaca, Baixão do Papagaio, Mearim, Ribeirão Botica, Rio Pindaré e um grande fragmento no entorno dos Rios Parnaíba e das Balsas. No Piauí, além das UC de Proteção Integral, seriam preservados blocos contínuos de cerrado próximos ao Riacho do Coqueiro, na bacia do Riacho dos Matões, Riachão dos Paulos e rio Parnaíba. No Tocantins, que no cenário BAU não apresentava áreas significativas de cerrado fora de UC de Proteção Integral, manteriam neste cenário algumas áreas ao sul, no município de Paranã, na divisa com a Bahia entre as cidades de Novo Jardim e Aurora do Tocantins, na bacia do rio das Balsas e na bacia do rio Vermelho. Na Bahia seriam mantidos até 2060 quatro grandes remanescentes, um nas imediações do Refugio de Vida Silvestre Veredas do Oeste Baiano, outro entre os rios Correntina e Guará, outro na bacia do rio São Desidério e outro ao norte, na APA do Rio Preto. No estado de Goiás, além das UC de Proteção Integral, seriam mantidos diversos remanescentes (menores que os da Bahia), além de pequenos fragmentos nas imediações da cidade de Caiapônia, na bacia do Rio do Peixe, no Ribeirão Paraiso, no Ribeirão Ferro e na área da APA do Pouso Alto. No Distrito Federal, além das UC de Proteção Integral, restariam áreas de cerrado entre as cidades de Brazlândia e Sobradinho, na bacia do Rio Maranhão, APA Gama Cabeça de Veado e margem leste do Rio São Bartolomeu. No estado de Minas Gerais, além das UC de Proteção Integral, restaria grande parte da Serra do Espinhaço, além de diversas bacias, como as do Rio Borrachudo, Rio da Prata, Córrego da Carranca, Ribeirão Santa Cruz, e uma grande área continua no Mosaico do Grande Sertão Veredas. Nos estados de São Paulo e Paraná restariam conjuntos de pequenos fragmentos próximos a rios, tais como o Moji-Guaçu, Jacaré-pepira, rio Sapucaí e rio Fortaleza no Paraná. No Mato Grosso, seriam mantidas áreas de relevo mais acidentadas e afastadas de cidades, além das Terras Indígenas e UC, destacando-se as porções próximas

aos rios Agrimensor Santiago, Cuiabá do Bonito, Forquilha, Araguaia e Aricá-mirim. No Mato Grosso do Sul seriam mantidas áreas pequenas de cerrado nas bacias do Rio Sucuriú, Folha dos Padres, próximo ao Pantanal e às cabeceiras dos rios próximos ao Rio Midaque, além das Terras Indígenas e UC de Proteção Integral.

É importante frisar que o fato do cenário IPC apresentar paisagens com menos remanescentes de Cerrado em 2060 em algumas Regiões Hidrográficas se deve ao fato de que essas apresentam pouquíssimos remanescentes já em 2009, como é o caso da R.H do Paraná, ou por terem grandes áreas remanescentes fora dos *constraints* (em especial das áreas prioritárias), estando, portanto, mais vulneráveis ao efeito de “fuga” do desmatamento, como é o caso da R.H. Atlântico Nordeste Ocidental e Parnaíba.

Tendo em vista os resultados dos cenários BAU e IPC projetados para 2060, fica exposta a necessidade de intervenções capazes de diminuir a taxa de desmatamento no Cerrado, ou até de se decretar a moratória do desmatamento. Isso porque o cenário IPC demonstra que mesmo com taxas de desmatamento reduzidas em áreas específicas, o desmatamento pode ser realocado, gerando vastas áreas sem remanescentes de Cerrado e uma porcentagem absoluta de remanescente equivalente do cenário BAU. Um meio de se contornar essa questão é a implementação efetiva de Reservas Legais – RL, Áreas de Preservação Permanente – APP, e Reservas Particulares do Patrimônio Nacional - RPPN. O que implicaria em restaurar milhares de hectares desmatados irregularmente, problema esse comum a todo o Cerrado, mas mais evidente na porção sul do bioma, onde a R.H. do Rio Paraná tem, em 2010, cerca de 15% de Cerrado e em 2060 ficaria com menos de 10% (cenário BAU e IPC), o que indica um alto passivo de Reserva Legal e APP. Isso expõe o fato de que será necessária uma cartela de ações de combate ao desmatamento para que daqui a 50 anos tenhamos uma paisagem legal, que cumpra com os quesitos de RL e APP; conectada, permitindo fluxo gênico; com UC de Proteção Integral, protegendo grandes fragmentos; e UC de Uso Sustentável e Áreas Prioritárias, manejadas de maneira a proporcionar a coexistência de serviços ecossistêmicos e a biodiversidade juntamente com ações de rentáveis de baixo impacto.

Após analisar esses cenários, uma série de perguntas deve ser feita pensando em cada uma das paisagens representadas nos mapas, entre elas: Essa paisagem preserva os serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes no solo, estabilização do solo e principalmente manutenção da quantidade e qualidade da água?

Quanto à biodiversidade, essa paisagem mantém habitats viáveis às espécies locais? Esse arranjo da paisagem é capaz de manter a polinização? As UC existentes são suficientes? O que torna uma UC eficiente em conter o desmatamento? No âmbito socioeconômico, essas paisagens são produtivas? As ferramentas de zoneamento, tais como Zoneamento Ecológico Econômico, estão sendo respeitados? A produção pecuária está sendo eficiente? As áreas já degradadas estão sendo reutilizadas ou recuperadas? As obras de infraestrutura estão sendo acompanhadas de mitigações ou compensações socioambientais? Os bens produzidos geram mais receitas ou mais passivos socioambientais? A produção agroextrativista está sendo devidamente estimulada? Esses desmatamentos são legais? Entre tantas outras questões que merecem avaliações rigorosas em estudos futuros e devem ser levadas em conta para o planejamento da ocupação responsável do Cerrado.

Os cenários mostraram que as UC de Proteção Integral têm sido eficientes em segurar o desmatamento, assim como grande parte das Terras Indígenas. No entanto as seguidas desafetações de UCs, em especial no norte do país trazem à tona a real possibilidade de se haver uma diminuição da rede de UC do Cerrado, tal qual já ocorreu, por exemplo, com no antigo Parque Nacional do Tocantins, inicialmente com mais de 600.000 hectares. A unidade, que durante o governo militar em 1981, teve parte de seu território desafetado e hoje tem 60.000 hectares e é conhecida como Parque da Chapada dos Veadeiros, outro exemplo é o Parque Nacional das Emas, que em 1972 deixou de ter 500.000 hectares e passou a ter 131.868 hectares entre diversos outros casos (ARZOLIA, *et al.*, 2005).

Outro aspecto sobre a rede de UC no Cerrado é a sua insuficiência quantitativa, tendo em vista o patrimônio natural a ser preservado e o ritmo do desmatamento. De 2008 a 2012, foram protegidos 341.128 hectares em UCs no Cerrado, menos do que 14% do que foi criado só no ano de 2006 (2.504.318 hectares)<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Análise feita com base nos dados espaciais do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação – CNUC.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho gerou um modelo de predição de mudança do uso do solo robusto e plausível, conforme comprovado pela validação. O que possibilitou a geração de um cenário padrão (BAU) condizente com as tendências de desmatamento observadas até então, além de cenários extrapolados, baseados em possíveis intervenções tanto na intensificação do desmatamento (ID) quanto na implementação de políticas conservacionistas (IPC).

No caso tanto dos cenários BAU quanto no cenário ID, as situações de maior vulnerabilidade ao desmatamento foram as que envolviam diferentes configurações das seguintes características; áreas próximas a áreas já desmatadas, áreas próximas a rodovias, pequenos fragmentos e áreas fora de UC de Proteção Integral e Terras Indígenas. Sobretudo aquelas associadas as fronteiras agropecuárias, do Oeste da Bahia, Matopi, noroeste mato-grossense, centro do Tocantins e sudeste do Mato Grosso do Sul.

O cenário IPC demonstrou que se as ações e políticas de prevenção ao desmatamento as áreas de UC e Terras Indígenas seriam mantidas. Caso se intensifique a inibição ao desmatamento nas Áreas Prioritárias à Conservação e nas UC, seria possível manter grandes áreas conservadas, além de conjuntos de fragmentos passíveis de servirem de habitat para algumas espécies. O cenário IPC cumpre o papel importante de demonstrar o efeito de “fuga” do desmatamento. Simulando a situação que um agente desmatador se vê inviabilizado ou desestimulado a desmatar em determinada área (*constraints*) e por isso se desloca e desmata em outra área.

Mesmo no cenário IPC, a maior parte do Cerrado não conta com remanescentes suficientes para a proteção dos recursos hidrológicos e outros serviços ambientais. Isso indica a necessidade de políticas e ações eficazes em restauração. Para que através dela possa ser restabelecida a conectividade entre grandes fragmentos e protegidas as áreas mais vulneráveis, como nascentes, áreas de recarga de aquífero e margens de rios. O que demonstra a importância da conservação em áreas privadas por meio da Reserva Legal e Área de Preservação Permanente.

Tendo em vista o novo código florestal e as incertezas sobre a forma e intensidade de sua implementação, além de outros aspectos incertos, como o preço das *commodities*, é plausível imaginar que a paisagem do Cerrado no futuro seja próxima a um arranjo entre os

três cenários aqui elaborados. Onde em algumas regiões haveria intensificação do desmatamento, como na região do “Matopi” (Maranhão, Tocantins e Piauí), Oeste Baiano e região central do Mato Grosso, próximo a Lucas do Rio Verde, todas áreas de fronteira agrícola. Outras regiões podem despontar como catalizadoras de conservação, montando e fortalecendo arranjos produtivos de Produtos não madeireiros em meio a Mosaicos de UC, tal qual na região do Jalapão, Grande Sertão Veredas, Serra dos Pireneus e Serra do Espinhaço; outras podem manter remanescentes estimuladas pelo ecoturismo ou mecanismo de Pagamento por Serviço Ambiental, tais como, Lençóis Maranhenses, Serra da Canastra, Diamantina, Chapada dos Veadeiros e Cavalcante.

Independente de qual dos três cenários o futuro real do Cerrado se aproxime, a tendência do desmatamento indica a consolidação de paisagens majoritariamente fragmentadas e com seus serviços ecossistêmicos fragilizados.

Os dados demonstram que as taxas de desmatamento do Cerrado são maiores que as ações de conservação, tais como a criação de UC, averbação de reservas legais e manutenção de APP entre outras iniciativas. Com isso, recursos naturais insubstituíveis estão sendo perdidos. Portanto é evidente a necessidade de políticas públicas contundentes para frear a conversão de vegetação nativa para usos agropecuários e o presente estudo pode auxiliar na tomada de decisões para o planejamento territorial do Cerrado.

## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AB´SABER, A. N. **O domínio dos Cerrados: introdução ao conhecimento**. Rio de Janeiro. 1983.

AB'SABER, A. N. Posição das superfícies aplainadas no Planalto brasileiro. **Notícia Geomorfologica**, p. 52-55, 1960.

AB'SABER, A. N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na America do Sul, por ocasião dos periodos glaciais quaternarios. **Paleoclimas**, 1977a.

ADÁMOLI ET AL. Solos dos cerrados. In: GOEDERT, W. J. **Caracterização da região dos cerrados**. São Paulo: Embrapa, 1986. p. 33-74.

ADÁMOLI ET AL.,. **Solos dos cerrados: tecnologias e estrategias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1987. 33-98 p.

AGUIAR, L. M. S.; MACHADO, R. B.; MARINHO FILHO, J. A diversidade biologica do Cerrado. In: AGUIAR, L. M. S.; CAMARGO, A. **Ecologia e caracterização do Cerrado**. Planaltina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, 2004. p. 19-42.

ALHO, C. J. R.; MARTINS, E. S. **De Grão em Grão, o Cerrado Perde Espaço: Cerrado – Impactos do**. Brasília: WWF- Fundo Mundial para a Natureza, 1995.

ALMEIDA, C. M. et al. Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land-use dynamics. **International journal of Geographical Information Science**, p. 943-963, 2008.

ARZOLIA, F. A. et al. Contributions for the discussion about the removal of areas in full protection nature conservation units. **Política e Legislação**, São Paulo, 2005. 631-640.

BENITO, P. R. et al. Land use change in a Mediterranean metropolian region and its periphery:assessment of conservation policies through CORINE Land Conver data and Markov models. **Forest Systems**, p. 315-328.

CAMARON, E. S. et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, n. 25, p. 1965-1978, setembro 2005.

CAVALCANTI, R. B. Perspectivas e desafios para conservação do Cerrado no seculo 21. In: MMA **Cerrado**. Brasília: MMA, 2005. p. 432-439.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - ESALQ/USP**, 2011. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/>>. Acesso em: 1 julho 2012.

- CHAVEIRO, E. F.; BARREIRA, C. C. M. A. Cartografia de um pensamento de Cerrado. In: PELÁ, M.; CASTILHO, D. **Cerrados: perspectivas e olhares**. Goiânia: Vieira, 2010. p. 182.
- CLANCY, D.; TANNER, J. E.; MCWILLIAM, S. Quantifying parameter uncertainty in a coral reef model using Metropolis-Copled Markov Chain Monte Carlo. **Ecological Modelling**, p. 1337-1247, 2010.
- COUTINHO, L. M. O Conceito de bioma. **Acta Botanica Brasil**, 14 junho 2006. 13-23.
- COUTINHO, M. O Conceito de Cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, v. I, n. I, p. 17-23, 1978.
- CSR/IBAMA. **Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no Cerrado, 2002 a 2008: dados revisados**. Brasília. 2009.
- CSR/IBAMA. **Monitoramento do bioma Cerrado 2008-2009**. Brasília. 2011a.
- CSR/IBAMA. **Monitoramento do bioma Cerrado 2009-2010**. Brasília. 2011b.
- DENG ET AL. Integration of multiple data sources to simulate the dynamics land systems. **Sensors**, p. 620-634, 2008.
- DIAS, B. F. S. **Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. Brasília. 1992.
- DNIT. [www.dnit.gov.br](http://www.dnit.gov.br). **DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte**, 2012. Disponível em: <<http://dnit.gov.br/mapas-multimodais>>. Acesso em: 1 abril 2012.
- DOMINGOS, D. C. C. Alternativa de Uso Sustentavel do Bioma Cerrado atraves de Praticas Extrativistas e Agro-extrativistas, p. 5-13, 2008.
- EASTMAN, R. **IDRISI Taiga**. Clark Universty. Worcester. 2009. (16.2).
- EASTMAN, R. J. **IDRISI Taiga, Guide to GIS and Image Processing**. Worcester. 2009.
- EITEN, G. Delimitação do conceito de Cerrado. **Arquivos do Jardim Botânico**, n. 21, p. 125-134, 1971.
- EITEN, G. The Cerrado vegetation of Brazil. **Botanical Review**, v. 38, p. 201-341, 1972.
- EITEN, G. **Duas travessias na vegetação do Maranhão**. Brasília. 1994.
- ESRI. **Arcgis Desktop 9.3**. ESRI. [S.l.]. 2006.
- FERREIRA, I. M. **Bioma Cerrado, um estudo das Paisagens do Cerrado**. Catalão: Universidade Federal de Goiás - UFG.

FERREIRA, L. G. et al. Dinâmica agrícola e desmatamentos em áreas de cerrado: uma análise a partir de dados censitários e imagens de resolução moderada. **Revista Brasileira de Cartografia**, Fevereiro 2009. 117-127.

FERREIRA, L. G. et al. DINÂMICA AGRÍCOLA E DESMATAMENTOS EM ÁREAS DE CERRADO: UMA ANÁLISE A PARTIR DE DADOS CENSITÁRIOS E IMAGENS DE RESOLUÇÃO MODERADA. **Revista Brasileira de Cartografia**, p. 117-127, 2009.

FERREIRA, M. E. et al. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: future scenarios and perspectives for conservation. **Journal of Land Use Science**, Londres, v. I, p. 1-19, maio 2012.

FUNAI. Funai. **http://funai.gov.br**, 2012. Disponível em: <<http://mapas.funai.gov.br/>>. Acesso em: 1 abril 2012.

GANEM, R. S.; DRUMMOND, J. A.; FRANCO, J. L. A. **Ocupação humana e impactos ambientais no bioma cerrado**: dos bandeirantes à política do Biocombustíveis. IV Encontro Nacional da Anppas. Brasília - DF: [s.n.]. 2008. p. 1-20.

GANEM, R. S.; DRUMMOND, J. A.; FRANCO, J. L. A. **Ocupação Humana e Impactos Ambientais no Bioma Cerrado**: dos bandeirantes à política de Biocombustíveis. IV Encontro Nacional de Anppas. Brasília: Anppas. 2008. p. 1-18.

GOMES, H. A Nova Matriz Espacial do Território Goiano. In: GOMES, H. **Universo do Cerrado**. Goiânia: UFG, 2008.

GONZALEZ, J. J. et al. **Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia**. Bogotá D.C. 2011.

GUAN, D. J. et al. Land use change of kitakyushu based on landscape ecology and Markov model. **Journal of Geographical Sciencies**, p. 455-468, 2008.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Models, Paradgmes and the New Geography. In: HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. **Models e Geography**. Londres: Methuen & Co, 1967.

HARIDASAN, M. Aluminum acumulation by some Cerrado native species in Central Brazil. **Plant and Soil**, p. 265-273, 1982.

HAYKIN, S. S. **Neural networks**: A comprehensive foundation. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

HERINGER, E. P. et al. **Bases para utilização Agropecuaria**. Simposio sobre o Cerrado. Itatiaia: EDUSP. 1977. p. 211-232.

IBGE & MMA. **Mapa de Biomas do Brasil**. Rio de Janeiro. 2004.

IBGE. IBGE- Dowload. **IBGE**, 1980. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default\\_prod.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm)>. Acesso em: 1 abril 2005.

- IBGE. [www.ibge.gov.br/home](http://www.ibge.gov.br/home). **IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2003. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br>>. Acesso em: 1 abril 2011.
- IPEA. <http://www.ipeadata.gov.br/>. **IPEADATA**, 2010. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 1 dezembro 2012.
- ISLAM, S.; AHMED, R. Land use change prediction in dhaka city using gis aided. **Journal Life Earth**, p. 81-89, 2011.
- ISPN. [www.ispn.org.br/povos-do-cerrado/a-humanidade-alcanca-o-cerrado/](http://www.ispn.org.br/povos-do-cerrado/a-humanidade-alcanca-o-cerrado/). **www.ispn.org.br**, 1 mar. 2012. Disponível em: <<http://www.ispn.org.br/povos-do-cerrado/a-humanidade-alcanca-o-cerrado/>>.
- JESUS, S. C.; MIURA, A. K. **Análise espacial de fragmentos de Cerrado como subsídio para a seleção de áreas prioritárias para conservação**. Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal: INPE. 2009. p. 3943-3950.
- Ji, C. Y. Land-use classification of remotely sensed data using Kohonen self organizing feature map neural networks. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, p. 1451-1460, 2000.
- KAVZOGLU, T.; MATHER, P. M. The use of back-propagation artificial neural networks in land cover classification. **International Journal of Remote Sensing**, p. 4907-4938, 2003.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. M. A Conservação do Cerrado brasileiro. **MEGADIVERSIDADE**, 1 julho 2005. 147-155.
- KLINK, C. A.; MOREIRA, A. G. Past and current human occupation and land-use. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. **The Cerrado of Brazil**. New York: Columbia University Press, 2002. p. 69-88.
- KLINK, C.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **MEGADIVERSIDADE**, v. I, n. I, p. 147-155, 2005.
- LAMBIN ET AL. The cause of land use cover change:moving beyond the myths. **Environmental Change**, p. 261-269, 2001.
- LEWINSOHN, T. M. Avaliação do estado do conhecimento da biodiversidade brasileira. **Biodiversidade**, Brasília, v. 2, 2006. ISSN 15.
- LI, X.; YEH, A. G. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use change using GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, p. 323-343, 2002.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Recursos Hídricos do Bioma Cerrado. In: SUELI, M. S.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2008. p. 1279.

- MACHADO, R. B. et al. **Estimativas de perda da área do**. Brasília, DF. 2004.
- MARINHO-FILHO ET AL. he Cerrado mammals: diversity, ecology and natural history. In: OLIVEIRA, P. S. **The Cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, 2002. p. 266-284.
- MARTHA ET AL. **A pratica da integração lavoura-pecuaria como ferramenta de sustentabilidade economica na exploração pecuaria**. Congresso de Forragicultura e Pastagens. Lavras: UFLA. 2007b. p. 367-391.
- MAS, J. F. et al. Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. **Environmental Modelling y Software**, p. 461-471, 2004.
- MENDONÇA ET AL. Flora Vascular do Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; NOGUEIRA, P. E. **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa, 2008.
- METZGER, J. P. Bases biológicas para a 'reserva legal'. **Ciência hoje**, p. 48-49, 2002.
- MMA. **Biodiversidade do Cerrado e Pantanal**. Brasília: MMA, 2007.
- MMA. Ministerio do Meio Ambiente - geoprocessamento. **Ministerio do Meio Ambiente**, 2012. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 1 abril 2012.
- MMA/IBAMA. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por Satelite: Monitoramento do Bioma Cerrado 2008-2009**. Brasília. 2011.
- MUELLER, C. C.; MARTHA, G. B. **A agropecuaria e o desenvolvimento socio-economico recente do Cerrado**. Simposio Nacional Cerrado. Brasília: Embrapa Cerrados. 2008. p. 1-41.
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, n. 403, p. 853-858, 2000.
- PINTO, M. N. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: PINTO, M. N. **Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília: Universidade de Brasília, 1993. p. 681.
- PIVELLO, V. R. The Use of fire in Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: Past and Present. **Fire Ecology**, p. 24-39, 2011.
- PONTIUS JR, R. G.; HUFFAKER, D.; DENMAN, K. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. **Ecological Modelling**, p. 445-461, 2004.
- PONTIUS, J. R. G.; CORNELL, J. D.; HALL, C. A. S. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. **Agr. Ecosyst. Environ.**, n. 85, p. 191-203, 2001.

PREVEDELLO, J. A.; CARVALHO, C. J. B. Conservação do Cerrado brasileiro: o método pan-biogeográfico como ferramenta para a seleção de áreas prioritárias. **Natureza & Conservação**, Abril 2006. 39-57.

SANO, E. E. **Mapeamento de cobertura vegetal do Bioma Cerrado: estratégias e resultados**. Planaltina. 2007.

SANO, E. E. et al. **Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado**. Planaltina. 2008.

SANO, E. E.; FERREIRA, L. G. **Monitoramento semidetalhado (escala de 1: 250.000) de ocupação de solos do Cerrado: considerações e proposta metodológica**. Anais XII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia: INPE. 2005. p. 3309-3316.

SANTOS, E. V. et al. **A Ocupação do Bioma Cerrado: da expansão da fronteira agrícola aos dias atuais**. Catalão: UFG. 2006. p. 1-14.

SARMIENTO, G.; PINILLOS, M. O Caso das savanas tropicais da América do Sul: quando a sustentabilidade econômica e ecológica não é suficiente. In: GARAY, I.; BECKER, B. **Dimensões humanas da biodiversidade: o desafio de novas relações sociedade-natureza no século XXI**. Petropolis: Vozes, 2006. p. 215-237.

SCHULZ, J. J. et al. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975 - 2008). **Applied Geography**, n. 30, p. 436-447, 2010.

SCHULZ, J. J. et al. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975 - 2008). **Applied Geography**, p. 435-447, 2010.

SHMITZ, P. I. Caçadores e coletores antigos da região do Cerrado. In: PINTO, M. N. **Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília: Universidade de Brasília, 1993. p. 681.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. **dinamica**, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>>. Acesso em: 1 maio 2012.

THAPA, B. R.; MURAYAMA, Y. Scenario based urban growth allocation in Kathmandu Valley, Nepal. **Landscape and Urban Planning**, p. 140-148, 2012.

TISCHENDORF, L.; FAHRING, L. On the usage and measurement of landscape connectivity. **OIKOS**, Copenhagen, 31 Janeiro 2000. 7-9.

TUNER II, B. L. et al. Land-use and land-cover change. **Science/Research Plan.**, Stockholm e Geneva, v. 7, n. 35, p. 132, 1995.

UFG, LAPIG, CI & TNC. **Monitoramento de Mudanças na Cobertura Vegetal Remanescente do Bioma Cerrado**. Goiânia. 2008.

USGS. [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov). **USGS - science for a changing world**, 2010. Disponível em: <<http://eros.usgs.gov>>. Acesso em: 1 abril 2011.

VALDIVIESO, F. O.; SENDRA, J. B. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. **Journal of Hydrology**, p. 256-263, 2010.

VELDKAMP, A.; LAMBIN, E. F. Predicting land-use change. **Agriculture Ecosystems & Environment**, p. 1-6, 2001.

VERBURG, P. H. et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: CLUE-S model. **Environmental Management**, p. 391-405, 2002.

WEHRMANN, M. E. S. **A soja no Cerrado de Roraima: um estudo da penetração da agricultura moderna em regiões de fronteira**. Tese (Doutorado em Sociologia). Brasília: Departamento de Sociologia, Universidade de Brasília, 1999.

WITH, K. A.; KING, A. W. The use and misuse of neutral landscape models in ecology. **Oikos**, v. 79, p. 219-229, 1997.

YANG, X.; ZHENG, X.-Q.; LV, L.-N. A Spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata. **Ecological Modelling**, p. 11-19, 2012.