



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.17.02.25-TDI

**HETEROGENEIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO  
DESMATAMENTO DO CERRADO BRASILEIRO:  
ESTIMATIVAS E CENÁRIOS DE EMISSÕES DE  
CARBONO**

Alan de Brito

Tese de Doutorado do Curso  
de Pós-Graduação em Ciência do  
Sistema Terrestre, orientada pela  
Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar,  
aprovada em 30 de maio de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LSQB68>>

INPE  
São José dos Campos  
2016

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

### **Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.17.02.25-TDI

**HETEROGENEIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO  
DESMATAMENTO DO CERRADO BRASILEIRO:  
ESTIMATIVAS E CENÁRIOS DE EMISSÕES DE  
CARBONO**

Alan de Brito

Tese de Doutorado do Curso  
de Pós-Graduação em Ciência do  
Sistema Terrestre, orientada pela  
Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar,  
aprovada em 30 de maio de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LSQB68>>

INPE  
São José dos Campos  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Brito, Alan de.

B777h Heterogeneidade espaço-temporal do desmatamento do Cerrado brasileiro: estimativas e cenários de emissões de carbono / Alan de Brito. – São José dos Campos : INPE, 2016. xviii + 156 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/06.17.02.25-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.  
Orientadora : Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar.

1. Savana brasileira. 2. Emissão de gases de efeito estufa.  
3. Cenários. 4. Desmatamento. 5. Cerrado. I.Título.

CDU 504.7:504.122(213.54)(81)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Alan de Brito**

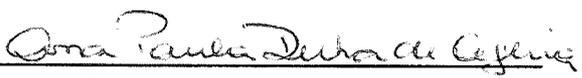
Título: "HETEROGENEIDADE ESPAÇO - TEMPORAL DO DESMATAMENTO DO CERRADO BRASILEIRO: ESTIMATIVAS E CENARIOS DE EMISSÕES DE CARBONO".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Ciência do Sistema Terrestre**

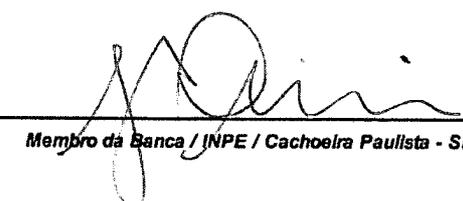
Dr. Plínio Carlos Alvalá

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / SJCampos - SP

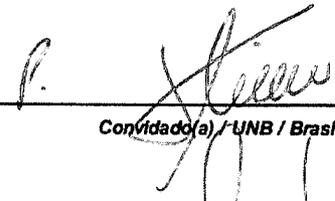
Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

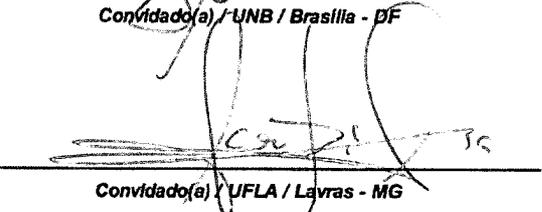
Dr. Gilvan Sampaio de Oliveira

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Mercedes Maria da Cunha  
Bustamante

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UNB / Brasília - DF

Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UFLA / Lavras - MG

*Este trabalho foi aprovado por:*

( ) maioria simples

(x) unanimidade

São José dos Campos, 30 de Maio de 2016



## AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial minha orientadora Dra. Ana Paula Dutra Aguiar pelos ensinamentos e confiança ao longo destes anos. Você é um exemplo não só de profissionalismo como de serenidade, lealdade, companheirismo e dedicação aos orientados e à ciência.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) pela singular estrutura de aprendizado e pesquisa. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre (PGCST), principalmente aos colegas, professores e secretárias do programa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos no Brasil. Ao Programa de Doutorado Sanduíche (PDSE) da CAPES pela concessão da bolsa de estágio doutoral na Alemanha.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e à Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA) pela concessão da bolsa de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial.

Ao Dr. Patrick Hostert e Dr. Pedro Leitão pela orientação e confiança no desenvolvimento de parte deste trabalho desenvolvido na Humboldt-Universität zu Berlin. Aos colegas do Laboratório de Geomática da Humboldt. Em especial à pesquisadora, colega e amiga Ms. Letícia Hissa, pelo companheirismo, amizade e lealdade.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa LuccME/INPE-EM do CCST, Ms. Talita Assim, Dr. Eloi Dalla-Nora, Ms. Roberta Cantinho, Dra. Bruna Leal e Diego Melo pela ajuda nas diversas etapas deste trabalho.

Aos queridos amigos Evelini Rocha, Tayrine Parreira, Adriana Koumrouyam, Camila Cossetin, Chica Veloso, Fernanda Casagrande, Fernanda Kolling, Fernanda Arguello, Grasiela Rodrigues, Vagner Camilotti, Víctor Maus, Taise Farias, Karinne Deusdará, Simone Del Ducca, entre tantos outros.

À minha amada família, especialmente aos meus pais, irmãos e sobrinhos.

A todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.



## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o de promover o entendimento da relação entre a dinâmica espaço-temporal do processo de desmatamento e a heterogeneidade intrarregional do Cerrado Brasileiro, a fim de subsidiar a construção de um modelo espacialmente explícito de estimativas de emissões atuais e futuras de gases de efeito estufa (GEE). Para tanto, foi construído um banco de dados espacial e multitemporal, onde foram inseridas informações de distribuição de desmatamento, de densidade de biomassa e 36 variáveis ambientais, de acessibilidade a mercados, atratividade econômica, demográficas, tecnológicas, de estrutura agrária, sociais e econômicas. A análise do padrão do desmatamento ocorrido no bioma foi realizada por meio da construção de Mapas de Kernel e da análise do desmatamento por Estado da Federação e tipo de formação vegetacional (campestre, savânica e florestal). Foi também realizada a Análise de Agrupamentos para promover a estratificação do Cerrado de acordo com as características ambientais e socioeconômicas com o intuito de caracterizar o desmatamento de acordo com as subregiões estratificadas. Adicionalmente, foram estimadas as emissões de carbono por desmatamento de forma espacialmente explícita, personalizando o arcabouço genérico de modelagem INPE-EM para o bioma: o INPE-EM BRCerrado. De acordo com os resultados obtidos com a caracterização do desmatamento, o modo não espacial do modelo (1850-2002) foi parametrizado, analisando o carbono liberado para cada região estratificada e avaliando as incertezas das estimativas associadas. Foram realizadas estimativas para três diferentes cenários futuros de desmatamento até 2030, tomando como base informações disponíveis na literatura científica e hipóteses baseadas na revisão do Código Florestal Brasileiro (CFB) e na Contribuição Nacionalmente Determinada Pretendida (iNDC) do país. Por fim, foram estimadas as emissões líquidas (emissão CO<sub>2</sub> por corte raso - absorção CO<sub>2</sub> por regeneração) para os três cenários, de acordo com cada tipo de formação vegetacional. Os resultados da análise espaço-temporal do desmatamento do Cerrado mostraram que os desmatamentos ocorridos até o ano de 2002 e entre 2002 e 2010 apresentam padrões distintos. Até 2002, o desmatamento incidiu mais sobre as formações campestres (54,5%), seguidas pelas formações savânicas (41,4%) e florestais (44,2%). Entre 2002 e 2010, a maioria das perdas de vegetação nativa (26,54%) ocorreu à custa da supressão de formações savânicas. Até 2010 46,27%, 69,5% e 49,54% das formações savânicas, campestres e florestais foram perdidos, respectivamente. As emissões brutas de gases de efeito estufa para o Cerrado Brasileiro entre 1850 e 2010 totalizaram 10,8 Gton CO<sub>2</sub>e (2,95 PgC). Estimativas para o período 2002-2010, obtidas utilizando dados oficiais de desmatamento espacialmente explícitos, foram de 1,37 Gton CO<sub>2</sub>e (0,37 PgC). Em relação ao total, as formações florestais são as maiores fontes de emissão, seguidas pelas savânicas e por último as campestres. Entre 2002 e 2010, aproximadamente 86% das emissões foram concentradas na frente de expansão do desmatamento localizada na região de MATOBIPA (estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), e nos estados de Goiás e Minas Gerais. As análises de sensibilidade revelaram que as estimativas de áreas desmatadas foram uma grande fonte de incertezas nas estimativas de emissões (46%). Adicionalmente, foram comparadas as emissões futuras potenciais de acordo com os três diferentes cenários: (a) desmatamento

“legal” de acordo com a revisão do CFB; (b) continuidade das taxas históricas de desmatamento e; (c) meta alternativa de redução de emissão para o Cerrado, no contexto da iNDC Brasileira. Os resultados indicaram que sem ações políticas adicionais, o cumprimento do CFB pode levar à liberação de 0,55 PgC (2 Gton CO<sub>2</sub> na atmosfera. Por outro lado, a meta alternativa de redução da emissão associada ao desmatamento do Cerrado, apresentou potencial de redução de aproximadamente 60% (0,81 Gton CO<sub>2</sub> ou 0,22 PgC) até 2030. Finalmente, as emissões líquidas médias dos Cenários A, B e C foram estimadas em 100 Mton CO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, 49 Mton CO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, e 41 Mton CO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup> respectivamente, reconsiderando a recomposição de 100% do passivo de Reserva Legal entre os anos de 2016 e 2030.

Palavras-chave: savana brasileira; emissão de gases de efeito estufa; cenários; desmatamento; Cerrado.

# SPACE-TIME HETEROGENEITY OF THE BRAZILIAN CERRADO DEFORESTATION: ESTIMATES AND SCENARIOS OF CARBON EMISSIONS

## ABSTRACT

This work aimed to understand the relationship between the spatial-temporal dynamics of forest clearing and the intra-regional heterogeneity in the Brazilian Cerrado, in order to subsidize the development of a spatial explicit model for actual and future emissions estimates of greenhouse gases (GHG). For this, a spatial and multitemporal geodatabase was built with information regarding forest clearing distribution, biomass density, and 36 variables concerning market accessibility, economic attractiveness, demography, technology, agrarian infrastructure, social, and economic data. Forest clearing pattern analysis in the biome was performed through the analysis of Kernel maps, the forest clearing data in the Brazilian States and vegetational units (grassland, savanna, and forest). The biome was stratified in regions according to its environmental and socioeconomic characteristics through a Cluster Analysis in order to characterize the forest clearing patterns within these regions. Additionally, carbon emissions from deforestation were spatially explicit estimated by adapting the INPE-EM modelling framework to the biome: the INPE-EM BRCerrado. The non-spatial mode of the model (1850-2002) was parameterized according to the results obtained from the forest clearing characterization. The carbon released was analyzed within the stratified regions and the associated uncertainties were evaluated. Carbon emissions estimates for three different future scenarios of forest clearing were performed for the biome up to 2030. These scenarios were based on information available in scientific literature and hypotheses based on both Brazilian Forest Code revision and in the *intended Nationally Determined Contribution* (iNDC). Lastly, Net Emissions (CO<sub>2</sub> emissions from clear cut - CO<sub>2</sub> absorptions through regeneration) were estimated for the three scenarios according to the vegetation unit. The results of the deforestation spatial-temporal analysis revealed that forest clearing that had occurred up to 2002 and between 2002 and 2010 had distinct patterns. Up to 2002, deforestation occurred mainly on grasslands (54.5%), followed by savannas (41.2%). Between 2002 and 2010, the most of the native vegetation loss (26,5%) occurred on the expenses of savanna formations. By 2010, 46.27%, 69.5%, and 49.54% of savannas, grasslands, and forest were lost, respectively. Between 1850 and 2010, gross deforestation emissions for the Brazilian Cerrado totaled 13.44 GtonCO<sub>2</sub>e (3.66 PgC). Estimates for the period 2002-2010, obtained using official spatially explicit deforestation estimates were of 1.438 Gton CO<sub>2</sub>e (0.40 PgC). We found that, relative to total emissions, woodland removal were the main sources of GHG from land cover change, followed by shrublands and grasslands. Between 2002 and 2010, 86% of the emissions were concentrated in the MATOPIBA region (Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia federal states), an expanding deforestation frontier, and also in federal states of Goiás and Minas Gerais. Our sensitivity analysis revealed that dissimilar deforestation estimates were the major source of estimates uncertainty (46%) followed by the heterogeneous distribution of biomass across space (17.5%).

Additionally, we compared potential future emissions according to three different scenarios: (a) “legal” deforestation according to the Brazilian Forest code (b) historical deforestation rates continuity; (c) alternative emission reduction target for the Cerrado in the context of the Brazilian Intended Nationally Determined Contribution (iNDC). Our results indicated that without further policy actions, the compliance with the Brazilian Forest Code could lead to the release of 3.7 Gton CO<sub>2</sub>e (1.01 PgC) into the atmosphere. On the other hand, our alternative target for emissions reduction in the Cerrado, showed the potential to decrease emissions in 60% (0.81 Gton CO<sub>2</sub> or 0.22 PgC) until 2030. Finally, average Net Emissions of the scenarios A, B, and C were estimated in 100 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, 49 Mton CO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup> e 41 Mton CO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, respectively, considering the recomposition of 100% of the Legal Reserve debt between 2016 and 2030.

Keywords: Brazilian savanna; Carbon book-keeping; Scenarios; Deforestation; Cerrado.

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 - Mapa demonstrativo dos tipos de vegetação do Bioma Cerrado.....	7
Figura 2.2 - Percentual de área desmatada no Cerrado, por Unidade Federativa, para o período 2002-2008. ....	12
Figura 2.3 - Desmatamento no Cerrado, por Unidade Federativa, para os períodos 2002-2008 (média anual), 2008-2009 e 2009-2010. ....	13
Figura 2.4 - Mapa dos municípios com valores Z (desmatamento total - desmatamento médio / desvio padrão) igual ou maior que 1 desvio padrão, indicando as novas frentes de desmatamento no Cerrado Brasileiro. ....	15
Figura 3.1 - Mapa de localização do Cerrado e demais biomas em relação aos limites das Unidades Federativas. ....	21
Figura 3.2 - Área de estudo dividida em células regulares de 5 x 5 km no estado de Minas Gerais. ....	24
Figura 3.3 - (a) Evolução das taxas anuais de desmatamento (MMA e LAPIG); (b) desmatamento acumulado até o ano de 2002; (c) desmatamento entre 2002 e 2010 de acordo com os dados do MMA; (d) desmatamento entre 2002 e 2010 de acordo com os dados do LAPIG. ....	25
Figura 3.4 - Mapa de Vegetação do Brasil. ....	26
Figura 3.5 - Mapa de formações vegetacionais presentes no Cerrado Brasileiro.....	28
Figura 3.6 - Mapa de biomassa acima do solo (AGB) distribuída no Cerrado brasileiro. ....	29
Figura 3.7 - Altitude média (metros) em células em células de 5 x 5 km. ....	34
Figura 3.8 - Umidade do solo média (%) em células em células de 5 x 5 km. ....	34
Figura 3.9 - Porcentagem de cobertura arbórea em células de 5 x 5 km.....	35
Figura 3.10 - Inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal (%) em células em células de 5 x 5 km.....	35
Figura 3.11 - Distância vertical em relação à drenagem mais próxima (metros) em células em células de 5 x 5 km.....	36
Figura 3.12 - Distância euclidiana a rodovias (pavimentadas e não pavimentadas) em células de 5 x 5 km.....	37
Figura 3.13. Distância euclidiana a rodovias pavimentadas em células de 5 x 5 km.....	38
Figura 3.14. Distância euclidiana a rodovias não pavimentadas em células de 5 x 5 km. ....	38
Figura 3.15 - Distância euclidiana a centros urbanos em células de 5 x 5 km. ....	39
Figura 3.16 - Distância euclidiana aos rios principais em células de 5 x 5 km.....	39
Figura 3.17 - Distância às principais cidades em células de 5 x 5 km. ....	40
Figura 3.18 - Distância euclidiana a depósitos minerais em células de 5 x 5 km. ....	41
Figura 3.19 - Quantidade produzida de madeira em tora (m <sup>3</sup> ) em células de 5 x 5 km. ....	42
Figura 3.20 - Quantidade produzida de lenha (toneladas) em células de 5 x 5 km.....	42
Figura 3.21 - Quantidade produzida de carvão vegetal (toneladas) em células de 5 x 5 km. ....	43
Figura 3.22 - Quantidade produzida de soja (toneladas) em células de 5 x 5 km. ....	43
Figura 3.23 - Quantidade produzida de cana-de-açúcar (toneladas) em células de 5 x 5 km. ....	44
Figura 3.24 - Quantidade produzida de milho em grãos (toneladas) em células de 5 x 5 km.....	44
Figura 3.25 - Quantidade produzida de algodão (toneladas) em células de 5 x 5 km.....	45
Figura 3.26 - Efetivo da pecuária (cabeças de bovinos) em células de 5 x 5 km.....	45
Figura 3.27 - (a) Densidade demográfica (habitantes.km <sup>2</sup> ) e (b) densidade populacional acima de 50 habitantes.km <sup>2</sup> em 2010 em células de 5 x 5 km.....	47
Figura 3.28 - Proporção da população urbana (%) em 2010 em células de 5 x 5 km. ....	47
Figura 3.29 - Proporção da população rural (%) em 2010 em células de 5 x 5 km. ....	48
Figura 3.30 - Percentual de migrantes em 2010 em células de 5 x 5 km. ....	48
Figura 3.31 - Número médio de tratores por município (%) em 2006 em células de 5 x 5 km. ....	50
Figura 3.32 - Número médio de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao número total de propriedades do município (%) em 2006 em células de 5 x 5 km. ....	50
Figura 3.33 - Porcentagem de pequenas propriedades rurais em relação ao número total de propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km. ....	52

Figura 3.34 - Porcentagem de médias propriedades rurais em relação ao número total de propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km. ....	53
Figura 3.35 - Porcentagem de grandes propriedades rurais em relação ao número total de propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km. ....	53
Figura 3.36 - Porcentagem de propriedades rurais pequenas em relação à área total das propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km. ....	54
Figura 3.37 - Porcentagem de propriedades rurais médias em relação à área total das propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km. ....	54
Figura 3.38 - Porcentagem de propriedades rurais grandes em relação à área total das propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km. ....	55
Figura 3.39 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km. ....	55
Figura 3.40 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura não familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km. ....	56
Figura 3.41 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km. ....	56
Figura 3.42 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura não familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km. ....	57
Figura 3.43 - Porcentagem de pessoas com dez anos ou mais alfabetizadas em células de 5 x 5 km. ....	58
Figura 3.44 - Porcentagem de pessoas com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, considerando a porcentagem que recebe apenas benefícios do governo em células de 5 x 5 km. ...	59
Figura 3.45 - Porcentagem de pessoas com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, desconsiderando a porcentagem que recebe apenas benefícios do governo em células de 5 x 5 km. ....	59
Figura 4.1 - Densidade de áreas desmatadas (Mapas de Kernel) no período de 2002-2011. ....	66
Figura 4.2 - Densidade de áreas desmatadas (Mapas de Kernel) no período de 2003-2015. ....	68
Figura 4.3 - Comparação de porcentagem de áreas de formação campestres desmatadas em relação ao total desmatado (a); Desmatamento acumulado até 2002 (PROBIO) (b); Desmatamento acumulado em formações campestres entre 2002 e 2010 de acordo com o MMA (c) e o LAPIG (d). ....	70
Figura 4.4 - Comparação de porcentagem de áreas de formação savânicas desmatadas em relação ao total desmatado (a); Desmatamento acumulado até 2002 (PROBIO) (b); Desmatamento acumulado em formações campestres entre 2002 e 2010 de acordo com o MMA (c) e o LAPIG (d). ....	71
Figura 4.5 - Comparação de porcentagem de áreas de formação florestais desmatadas em relação ao total desmatado (a); Desmatamento acumulado até 2002 (PROBIO) (b); Desmatamento acumulado em formações campestres entre 2002 e 2010 de acordo com o MMA (c) e o LAPIG (d). ....	72
Figura 4.6 - Valores finais de centro dos agrupamento ( <i>clusters</i> ) das variáveis ambientais. ....	81
Figura 4.7 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis ambientais e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG). ....	82
Figura 4.8 - Valores finais de centro dos agrupamento ( <i>clusters</i> ) das variáveis que representam a acessibilidade a mercados. ....	84
Figura 4.9 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis de acessibilidade a mercados e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG). ....	85
Figura 4.10 - Valores finais de centro dos agrupamento ( <i>clusters</i> ) das variáveis de atratividade econômica. ....	87
Figura 4.11 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis de atratividade econômica e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG). ....	88
Figura 4.12 - Valores finais de centro dos agrupamento ( <i>clusters</i> ) das variáveis que representam os fatores demográficos. ....	90

Figura 4.13 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis demográficas e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).....	91
Figura 4.14 - Valores finais de centro dos agrupamento ( <i>clusters</i> ) das variáveis que representam os fatores os fatores tecnológicos. ....	93
Figura 4.15 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis tecnológicos e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).....	94
Figura 4.16 - Valores finais de centro dos agrupamento ( <i>clusters</i> ) das variáveis que representam os fatores de estrutura agrária. ....	96
Figura 4.17 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis de estrutura agrária e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).....	97
Figura 4.18 - Valores finais de centro dos agrupamento ( <i>clusters</i> ) das variáveis que representam os fatores sociais e econômicos. ....	99
Figura 4.19 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis sociais e econômicas e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG). ....	100
Figura 5.1 - Cenário A: Localização e quantidade de novos desmatamentos (km <sup>2</sup> ) estimados com base no excedente florestal (SOARES-FILHO <i>et al.</i> , 2014) entre os anos de 2011 e 2030: (a) distribuição espacial da mudança; (b) taxa anual de desmatamento (km <sup>2</sup> ) após 2002.....	116
Figura 5.2 - Cenário B: Localização e quantidade de novos desmatamentos (km <sup>2</sup> ) simulados por Ferreira <i>et al.</i> (2013) (entre os anos de 2011 e 2030: (a) distribuição espacial da mudança; (b) taxa anual de desmatamento (km <sup>2</sup> ) após 2002.....	117
Figura 5.3 - Cenário C: Localização e quantidade de novos desmatamentos (km <sup>2</sup> ) estimados com base no excedente florestal (SOARES-FILHO <i>et al.</i> , 2014) entre os anos de 2011 e 2030, porém reduzidos a 10% do excedente em 2020: (a) distribuição espacial da mudança; (b) taxa anual de desmatamento (km <sup>2</sup> ) após 2002. ....	119
Figura 5.4 - Déficit (km <sup>2</sup> ) de Reserva Legal no Bioma Cerrado.....	120
Figura 5.5 - Resultados do modelo (2002-2010): (a) emissões de CO <sub>2</sub> (Mton) (1 <sup>a</sup> e 2 <sup>a</sup> ordem) devido à remoção da vegetação no Bioma Cerrado; (b) Emissões anuais de CO <sub>2</sub> e (MtonCO <sub>2</sub> e) entre 2002-2010 e taxas de desmatamento (D) (km <sup>2</sup> .ano <sup>-1</sup> ) distribuídas entre os grupos de formação vegetacional. C, S e F correspondem à formações Campestres, Savânicas e Florestais, respectivamente.....	123
Figura 5.6 - Emissões acumuladas (2002-2010) de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), monóxido de carbono (CO), metano (CH <sub>4</sub> ), óxido nitroso (N <sub>2</sub> O), óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) e o percentual do CO <sub>2</sub> imediatamente liberado pela queima da biomassa (CO <sub>2</sub> fire) no Cerrado.....	125
Figura 5.7 - Resultados da Exploração 1 (2002-2010): estimativas de emissão de CO <sub>2</sub> de primeira e segunda ordem (Mton) para o Bioma Cerrado, para dois conjuntos diferentes de desmatamento (km <sup>2</sup> ).....	126
Figura 5.8 - Resultados da Exploração 2 (2002-2010): estimativas de emissão de CO <sub>2</sub> de primeira e segunda ordem (Mton) para o Bioma Cerrado, para três submodelos de remoção da vegetação (VR1, VR2 e VR3).....	128
Figura 5.9 - Estimativas de emissões de CO <sub>2</sub> para o período 1850-2010-2030, considerando três cenários alternativos para o período 2011-2030.....	133



## LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 3.1 - Reagrupamento dos tipos fitofisionômicos em três classes de formação vegetacional (formações campestres, savânicas e florestais) e suas respectivas porcentagens de área no bioma.	27
Tabela 3.2 - Categorias e variáveis no banco de dados celular (células de 5 x 5 km <sup>2</sup> ), com suas respectivas descrições.	31
Tabela 4.1 - Desmatamento anual (km <sup>2</sup> ) do Cerrado por Unidade Federativa.	73
Tabela 4.2 - Desmatamento (km <sup>2</sup> ) de áreas de formação campestres, por Unidade Federativa, onde: BA é Bahia, DF Distrito Federal, GO Goiás, MA Maranhão, MG Minas Gerais, MS Mato Grosso do Sul, MT Mato Grosso, PA Pará, PI Piauí, PR Paraná, SP São Paulo e TO é Tocantins.	74
Tabela 4.3 - Desmatamento (km <sup>2</sup> ) de áreas de formação savânicas, por Unidade Federativa, onde: BA é Bahia, DF Distrito Federal, GO Goiás, MA Maranhão, MG Minas Gerais, MS Mato Grosso do Sul, MT Mato Grosso, PA Pará, PI Piauí, PR Paraná, SP São Paulo e TO é Tocantins.	75
Tabela 4.4 - Desmatamento (km <sup>2</sup> ) de áreas de formação florestais, por Unidade Federativa, onde: BA é Bahia, DF Distrito Federal, GO Goiás, MA Maranhão, MG Minas Gerais, MS Mato Grosso do Sul, MT Mato Grosso, PA Pará, PI Piauí, PR Paraná, SP São Paulo e TO é Tocantins.	76
Tabela 4.5 - Medidas de tendência central e de dispersão e número de observações válidas (N) por variável ambiental.	77
Tabela 4.6 - Medidas de tendência central e de dispersão e número de observações válidas (N) por variável socioambiental.	78
Tabela 4.7 Definição do número de agrupamentos para cada categoria de variável.	79
Tabela 4.8 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis ambientais.	80
Tabela 4.9 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam a acessibilidade a mercados.	84
Tabela 4.10 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam a atratividade econômica.	86
Tabela 4.11 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores demográficos.	89
Tabela 4.12 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores tecnológicos.	92
Tabela 4.13 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores de estrutura agrária.	96
Tabela 4.14 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores sociais e econômicos.	98
Tabela 4.15 - Contribuição dos agrupamentos nos desmatamentos observados pelos dados do MMA e LAPIG.	102
Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados no submodelo de biomassa B1, onde C significa “Formação Campestre”. S “Formação Savânica” e F “Formação Florestal”.	108
Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados nos submodelos de <i>ClearCutDeforestation</i> , onde C significa “Formação Campestre”. S “Formação Savânica” e F “Formação Florestal”.	112
Tabela 5.3 - Protocolo de exploração dos submodelos de desmatamento (D1 e D2), biomassa (B1) e de remoção da vegetação (VR1, VR2 e VR3).	114
Tabela 5.4 - Premissas para estimativa brutas de emissões de CO <sub>2</sub> por desmatamento nos cenários A, B e C.	115
Tabela 5.5 - Período de regeneração da biomassa por formação vegetacional.	121
Tabela 5.6 - Estimativa de emissão de CO <sub>2</sub> e para as formações vegetacionais do Cerrado.	124
Tabela 5.7 - Resultados do INPE-EM BRCerrado para o Cerrado Brasileiro: modelo de linha de base e submodelos alternativos de desmatamento (D1 e D2) e de remoção da vegetação (VR1, VR2 e VR3) para o modo não espacial (1850-2002) e espacial (2002-2010).	129
Tabela 5.8 - Resultados das estimativas de emissões para os Cenários A, B e C.	131



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos e hipóteses da tese.....	4
1.2 Estrutura do documento.....	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	7
2.1 Processo de ocupação do Cerrado .....	7
2.1.1 Ocupação e histórico de desmatamento .....	8
2.2 Estimativas de emissão para o Cerrado .....	17
3 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO .....	21
3.1 Área de Estudo .....	21
3.2 Construção dos bancos de dados .....	23
3.2.1 Dados de desmatamento .....	24
3.2.2 Dados de vegetação e biomassa.....	26
3.2.3 Fatores ambientais e socioeconômicos para análise de sub-regiões .....	29
4 ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO DESMATAMENTO NO CERRADO .....	61
4.1 Métodos.....	61
4.1.1 Análise dos padrões de desmatamento.....	61
4.1.2 Análise do desmatamento em sub-regiões no Cerrado .....	62
4.2 Resultados .....	65
4.2.1 Análise dos padrões de desmatamento.....	65
4.2.2 Análise do desmatamento em sub-regiões no Cerrado .....	77
5 ESTIMATIVAS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR DESMATAMENTO DO CERRADO BRASILEIRO .....	103
5.1 Métodos.....	103
5.1.1 Visão geral do INPE-EM.....	103
5.1.2 INPE-EM para o Cerrado Brasileiro.....	104
5.1.3 Cenários de emissão de desmatamentos futuros .....	114
5.2 Resultados .....	122
5.2.1 Emissão de gases de efeito estufa por mudança da cobertura vegetal no período 1850-2002: modelo linha de base.....	122
5.2.2 Explorações dos submodelos .....	126
5.2.3 Cenários de emissão de desmatamentos futuros .....	131
6 CONCLUSÃO.....	135
6.1 Síntese dos resultados e hipóteses de pesquisas .....	135
6.2 Considerações sobre aspectos metodológicos .....	140
6.3 Recomendações para políticas públicas .....	142
6.4 Sugestões para futuros trabalhos de pesquisa.....	144

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 147

## 1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, a maioria das mudanças da cobertura da terra ocorreu nos trópicos, onde grandes extensões de savanas e florestas úmidas foram substituídas por áreas de pastagens e terras agrícolas à taxas sem precedentes (GIBBS *et al.*, 2010). Tentativas recentes de quantificar a contribuição do desmatamento tropical para o *pool* global de carbono têm resultado em diferentes estimativas, variando de 0,81 a 2,2 PgC·ano<sup>-1</sup>, representando períodos de referência diferentes (TYUKAVINA *et al.*, 2015). Usando conjuntos de dados de alta resolução, Zarin (2012) relatou 2.270 Gt CO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup> como a linha de base da região pantropical para o período de 2000-2013. O mesmo autor também apontou que o Brasil destacou-se não só como o maior emissor, mas também como o país tropical mais bem sucedido na redução do desmatamento e das emissões de carbono a ele relacionadas entre 2000 e 2013 (ZARIN, 2012). O sucesso do Brasil em reduzir as perdas florestais é atribuído a uma série de políticas públicas (por exemplo, expansão da rede de áreas protegidas, aumento da fiscalização e aplicação da lei) e iniciativas do setor privado (por exemplo, moratória da soja e acordo do gado G4) implementados ao longo das últimas décadas (NEPSTAD *et al.*, 2014). No entanto, como a maioria das iniciativas tem como alvo o bioma Amazônia, outros ecossistemas brasileiros permanecem em grande parte vulnerável à expansão das fronteiras agrícolas, particularmente o Cerrado (savana brasileira) (GIBBS *et al.*, 2015). Hoje, o cumprimento da legislação ambiental e acordos do setor privado promoveram a diminuição do desmatamento no bioma amazônico, contribuindo para o desenvolvimento de uma nova fronteira agrícola no Cerrado (DALLANORA *et al.*, 2014), na região chamada MATOPIBA (acrônimo formado pelas primeiras letras dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) - atualmente a fronteira agrícola mais ativa no país - principalmente à custa de áreas de vegetação pristina (SPERA *et al.*, 2016).

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, um mosaico de formações de savana, cobrindo  $\approx 2$  milhões de km<sup>2</sup>, e parcialmente ou totalmente 11 Estados brasileiros e o Distrito Federal (IBGE, 2004a). A savana brasileira faz fronteira com todos os cinco demais biomas brasileiros, sendo listado como um dos *hotspots* mundiais para conservação da biodiversidade devido ao seu alto grau de endemismo de espécies combinado com a perda alarmante de seus *habitats* (MYERS *et al.*, 2000; KLINK; MACHADO, 2005). Surpreendentemente, apenas 8,6% do bioma estão legalmente protegido por unidades de

conservação e, desse total, apenas um terço pertencente às categorias de proteção integral (FRANÇOSO *et al.*, 2015; MMA, 2015a). Este nível de proteção está longe da meta de 17% sugerido pela Convenção sobre Diversidade Biológica (MMA, 1992). Diferentes aspectos socioeconômicos, políticos e institucionais também podem ser observados no bioma. A região envolve distintos atores sociais, como pequenos agricultores, populações tradicionais e indígenas, grandes produtores de grãos, pecuaristas, garimpeiros além de grandes indústrias dos mais variados setores (por exemplo, metalurgia, beneficiamento de produtos agrícolas, extração mineral, sucroalcooleiro, químico e madeireiro) (FERREIRA; BUSTAMANTE, 2011). Estes atores estabelecem formas de uso diferenciado dos recursos naturais de acordo com suas motivações e os diferentes sistemas de produção nos quais se encontram inseridos (SANTOS JUNIOR *et al.*, 2010).

O bioma já perdeu mais de 50% de sua cobertura natural e mais de 1 milhão de km<sup>2</sup> são ocupados por culturas e pastagens (SANO *et al.*, 2008; MMA, 2015a). Entre 1945 e 1995, 4,9±2,7 Pg C, ou seja, 23% da reserva original de carbono presente na vegetação original no Cerrado já foram perdidos (LEITE *et al.*, 2012). O desmatamento é espacialmente estruturado, com gradiente decrescente no sentido norte-sul, e foi gradualmente se expandindo em direção à porção centro-oeste do bioma desde a década de 1960 (DINIZ-FILHO *et al.*, 2009; BARRETTO *et al.*, 2013). A alteração da paisagem cresceu nas décadas de 1970 e 1980 devido às condições topográficas favoráveis, políticas governamentais dirigidas a projetos de colonização agrícola e aumento da tecnificação da agricultura, o que tornou possível cultivar nos solos inadequados do Cerrado (BARRETTO *et al.*, 2013; MMA, 2015a). Como consequência, o Cerrado Brasileiro acomodou a maior parte da soja, algodão, milho e - mais recentemente - a expansão da monocultura da cana-de-açúcar, ao mesmo tempo respondendo por 50% do rebanho brasileiro (IBGE, 2014; LAPOLA *et al.*, 2014).

Apesar das perdas massivas da cobertura natural, uma vasta quantidade de terras com vegetação intocada está legalmente disponível para o desmatamento no Cerrado (40 ± 3 Mha) (SOARES-FILHO *et al.*, 2014). As recentes mudanças no Código Florestal Brasileiro (CFB) têm aumentado a vulnerabilidade da vegetação remanescente à expansão da agricultura (RAJÃO; SOARES-FILHO, 2015; SPAROVEK *et al.*, 2015). O CFB é o conjunto de leis que regulam a conservação florestal dentro das propriedades privadas no Brasil (quantidade de terras que pode ser desmatada para produção e quantidade e

localização das florestas a serem conservadas). O novo CFB reduz consideravelmente as exigências de restauração para fins de regularização ambiental, além de conceder anistia aos donos de pequenas propriedades de terras com reservas legais insuficientes (parcela da vegetação nativa na propriedade rural que deve ser preservada). O Cerrado está particularmente fragilizado neste cenário, uma vez que a maior parte do bioma possui o menor nível de exigência de Reserva Legal de acordo com o CFB (apenas 20% da área da propriedade privada). Adicionalmente, a anistia representa uma oportunidade perdida para restauração da paisagem e da biodiversidade além do sequestro de carbono. Por fim, na recém-lançada iNDC Brasileira (Contribuição Nacionalmente Determinada Pretendida) (BRASIL, 2015), o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões anuais para 1,3 GtCO<sub>2</sub>e até 2025 e 1,2 GtCO<sub>2</sub>e até 2030. Embora a iNDC faça referência ao fim do desmatamento legal na Amazônia, o controle do desmatamento no Cerrado não é mencionado. Portanto, o mosaico restrito e isolado de áreas protegidas, o aumento da demanda por terra, as condições favoráveis do mercado e um arranjo institucional fraco, combinados, alimentam um cenário que coloca o Cerrado como uma potencial fonte de emissão de gases de efeito estufa e perda de biodiversidade a partir das mudanças de cobertura da terra.

Buscando entender o papel das mudanças da cobertura da terra como fonte de gases de efeito estufa (GEE), estudos anteriores foram baseados em diferentes estruturas de modelagem (por exemplo, modelos de contabilidade de carbono), que simulam os fluxos de carbono da biomassa entre os *pools* afetados pelo desmatamento (por exemplo, carbono do solo, liteira, necromassa, biomassa abaixo do solo e biomassa acima do solo) e para a atmosfera (HOUGHTON *et al.*, 2000; RAMANKUTTY *et al.*, 2007; PONGRATZ *et al.*, 2014). Usualmente, estas estruturas resultam estimativas a partir de uma combinação de conjuntos de dados - ou suposições baseadas no conhecimento - que representam as trajetórias do desmatamento e a densidade da biomassa vegetal. Entretanto, para distribuir as perdas de carbono no espaço e no tempo, também é fundamental representar corretamente o processo de desmatamento, as técnicas de remoção de vegetação, os sistemas de manejo e as condições ambientais, devido à sua influência na intensidade das emissões de GEE (AGUIAR *et al.*, 2012). Neste contexto, estimativas precisas devem se beneficiar da representação da heterogeneidade biofísica e socioeconômica presente no bioma (AGUIAR *et al.*, 2012). Publicações anteriores de estimativas de emissão de GEE para o Cerrado incluem parcialmente a heterogeneidade biofísica do bioma, por meio da aplicação de informação espacialmente explícita relacionada à densidade da biomassa

acima do solo (FERREIRA *et al.*, 2009; BUSTAMANTE *et al.*, 2012; LEITE *et al.*, 2012) e não consideram a heterogeneidade socioeconômica.

Dadas estas considerações gerais sobre modelagem de emissão de gases de efeito estufa por desmatamento e sua aplicação ao Cerrado Brasileiro, a próxima seção apresenta as hipóteses e objetivos geral e específicos desta tese.

### **1.1 Objetivos e hipóteses da tese**

Esta tese explora duas hipóteses sobre o processo de desmatamento no Cerrado e a consequente emissão de GEE:

1. O Cerrado possui uma trajetória espaço-temporal de desmatamento - e consequentemente de emissões de gases do efeito estufa - heterogênea, condicionada por sub-regiões com fatores biofísicos e socioeconômicos distintos.
2. Embora as formações vegetacionais do Cerrado apresentem densidade de biomassa mais baixa em relação à Amazônia, os impactos atuais e futuros do desmatamento podem ser significativos para o balanço de emissões em escala nacional e internacional.

O objetivo principal deste trabalho é:

Entender como a dinâmica espaço-temporal do processo de desmatamento está relacionada à heterogeneidade intrarregional do Cerrado Brasileiro, a fim de subsidiar a construção de modelo espacialmente explícito para estimativa de emissões atuais e futuras.

Para alcançar o objetivo geral, esta tese será conduzida em torno de três objetivos específicos:

- a) Estratificar o Cerrado de acordo com as características ambientais e socioeconômicas, visando caracterizar o desmatamento de acordo com as regiões estratificadas.
- b) Estimar as emissões de carbono por desmatamento no Cerrado de modo espacialmente explícito com base nos resultados da análise (a) para o período 1850-

2002, analisando o carbono liberado para cada uma das regiões estratificadas e avaliando as incertezas das estimativas.

- c) Apresentar estimativas para diferentes cenários futuros de desmatamento para o Bioma Cerrado até 2030, com base em cenários de desmatamento disponíveis na literatura (FERREIRA *et al.*, 2013) e hipóteses baseadas na revisão do Código Florestal Brasileiro (SOARES-FILHO *et al.*, 2014) e na Contribuição Nacionalmente Determinada Pretendida (iNDC) do país.

Neste contexto, esta tese adiciona aos esforços prévios de modelagem de emissão de gases de efeito estufa por corte e limpeza da vegetação do Cerrado:

- O aprofundamento do entendimento do processo de desmatamento ocorrido no Cerrado Brasileiro no período de 2002-2010, mediante o reconhecimento de padrões na distribuição espacial das áreas desmatadas.
- A representação da heterogeneidade biofísica do Cerrado Brasileiro por meio da espacialização não só das estimativas de biomassa, como também de diferentes parâmetros do modelo de acordo com três grupos de formação vegetal: campestres, savânicas e florestais.
- A representação da heterogeneidade socioeconômica presente no bioma, por intermédio da caracterização das áreas desflorestadas no período 2002-2010 com base nas regiões identificadas com características ambientais e socioeconômicas semelhantes.
- A discussão de cenários alternativos e plausíveis para a região, elaborados com base em elementos de políticas ambientais recentes (Código Florestal e iNDC).

Espera-se que os resultados obtidos possam subsidiar a construção e aperfeiçoamento de modelos de emissão de carbono, assim como contribuir com a discussão da política ambiental brasileira a curto e médio prazo.

## **1.2 Estrutura do documento**

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica. A Seção 2.1 discorre sobre os tipos de vegetação e processo de ocupação do Cerrado. A Seção 2.2 apresenta uma revisão sobre estimativas de emissão para o Cerrado;
- Capítulo 3 apresenta a área de estudo e o banco de dados espacialmente explícito construído para subsidiar as análises apresentadas no Capítulos 4 e 5;
- Capítulo 4 apresenta os métodos, resultados e discussão da identificação de sub-regiões com diferentes caminhos de emissão do carbono para a atmosfera;
- Capítulo 5 apresenta os métodos, resultados e discussão do desenvolvimento do modelo de emissão de gases de efeito estufa por desmatamento e cenários de emissão do Cerrado Brasileiro.
- Capítulo 6 apresenta as conclusões desta tese, as sugestões de futuros trabalhos além de recomendação de políticas públicas com base nos resultados do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo de fundamentação está organizado da seguinte forma. Inicialmente, o processo de ocupação e desmatamento do Cerrado Brasileiro é descrito (Seção 2.1). Em seguida, apresentamos uma revisão sobre modelagem computacional de emissão de gases do efeito estufa por desmatamento (Seção 2.2), explorando as fontes de incertezas associadas a estes modelos.

### 2.1 Processo de ocupação do Cerrado

Em sua vasta extensão territorial, o Cerrado brasileiro é formado por grande diversidade de fitofisionomias (25 tipos e subtipos de vegetação) (Figura 2.1), distribuídas em formações campestres, savânicas e florestais (RIBEIRO; WALTER, 2008). A ocorrência de cada tipo de formação vegetal está relacionada à coexistência e proporção de densidade dos estratos arbóreo e herbáceo (MIRANDA *et al.*, 2014).



Figura 2.1 - Mapa demonstrativo dos tipos de vegetação do Bioma Cerrado.

Fonte: Ribeiro e Walter (2008).

De acordo com Ribeiro e Walter (2008), as formações campestres são representadas pelas fitofisionomias principais de Campo sujo, Campo limpo e Campo rupestre, os dois primeiros podendo apresentar subtipos (Campo Sujo Seco, Campo Sujo Úmido e Campo Sujo com Murundus; e Campo Limpo Seco, Campo Limpo Úmido e Campo Limpo com Murundus) de acordo com as especialidades topográficas ou edáficas.

As formações savânicas compreendem as fitofisionomias do Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda. A fitofisionomia mais abundante é o cerrado

sentido restrito (*sensu stricto*), que ocupava originalmente aproximadamente 70% de todo o bioma (FELFILI *et al.*, 2005). O Cerrado sentido restrito é caracterizado pela presença de estratos arbóreos e arbustivos com espécimes tortas, de pequeno porte, inclinadas e com ramificações retorcidas (RIBEIRO; WALTER, 2008), sendo fitofisionomia que melhor descreve o aspecto savânico do bioma (MIRANDA *et al.*, 2014). Dependendo da densidade de indivíduos ou do ambiente em que se localiza, esta fitofisionomia pode apresentar quatro subtipos (Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre) (RIBEIRO; WALTER, 2008). Já o Palmeiral e a Vereda são caracterizadas pela dominância de espécies de palmeiras arbóreas.

Por fim, as formações florestais compreendem a Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão, tipos de vegetação com predominância de espécies arbóreas e com formação de dossel (RIBEIRO; WALTER, 2008).

O Cerrado, assim como as demais savanas encontradas no mundo, tem sido extensamente aproveitado por atividades agropecuárias e demais formas de ocupação, estando diretamente associado ao desenvolvimento econômico nacional (RIBEIRO; WALTER, 2008). Entretanto, nas últimas três décadas, a região vem sofrendo fortes impactos causados pelo homem. Dentre eles, o desmatamento proveniente da expansão de áreas para a produção de grãos e carne e a exploração predatória de seu material lenhoso para produção de carvão vegetal, compromete seriamente a biodiversidade que o bioma sustenta (RODRIGUES, 2005; QUEIROZ, 2009). Neste contexto, até o ano de 2010, 49,16% do total de vegetação original no bioma já haviam sido desmatados (MMA, 2011b). A Seção 2.1.1 apresenta aspectos da relação entre a dinâmica de ocupação do Cerrado Brasileiro e o desmatamento ocorrido na região, assim como estimativas de perda de vegetação original. Já a Seção 2.1.2 apresenta aspectos relevantes quanto ao estado atual do bioma e tendências observadas.

### **2.1.1 Ocupação e histórico de desmatamento**

A ocupação da região onde o Cerrado está inserido é antiga, existindo indícios da presença humana há pelo menos 12 mil anos. Entretanto, foi a partir dos séculos XVI e XVII que a região passou por mudanças mais profundas. Estas foram motivadas pela busca de pedras e metais preciosos, captura de índios para trabalhos forçados em engenhos e outras atividades e, exploração de minérios através das entradas de bandeiras, criando condições para o estabelecimento de vilas e comarcas ao longo da região (RIBERIO *et al.*, 2005).

Em meados do século XX, foram instituídas políticas de interiorização do país com o intuito de ampliar o mercado interno, incentivar a imigração, aumentar a produção agropecuária, entre outros fatores. Dentre estas políticas, a “Marcha para Oeste”, décadas de 1930 a 1960, representou de forma simbólica as mudanças na dinâmica de ocupação do Cerrado, principalmente da região Centro-Oeste. Neste período, foram construídas importantes cidades como Goiânia e Brasília e implantados novos eixos rodoviários como a BR-153 (Belém-Brasília) e a BR-364 (Cuiabá-Porto Velho) (KLINK; MOREIRA, 2002; MMA, 2011c).

As formas rudimentares de cultivo da terra voltadas para subsistência até então empregadas foram gradativamente substituídas a partir dos anos 1970 por uma estrutura econômica e tecnológica mais moderna. Esta nova condição foi impulsionada pela implantação de infraestrutura, instituição do crédito agrícola subsidiado e vinculado a pacotes tecnológicos promovendo uma intensa exploração do Cerrado. Neste contexto, o papel do Estado foi decisivo para a ocupação agrícola do Cerrado Brasileiro e se deu através da implantação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), responsável pela geração de tecnologias agrícolas aptas para as características específicas do Cerrado e, da instituição do Sistema Nacional de Crédito Rural para garantir o aumento da produtividade e do lucro aos empreendimentos rurais (SILVA, 2001). Até meados dos anos 80, os incentivos se expressaram com a implantação de políticas agrícolas desenvolvimentistas baseadas nos princípios da Revolução Verde como: o Programa de Desenvolvimento do Centro-Oeste (PRODOESTE), o Programa de Desenvolvimento do Cerrado (POLOCENTRO) e o Programa de Cooperação Nipo-Brasileiro para Desenvolvimento do Cerrado (PRODECER) (ALHO; MARTINS, 1995; SILVA, 2001; MOYSÉS; SILVA, 2008; MMA, 2011c).

Orientado por uma dinâmica econômica que visava à maximização dos investimentos, o período pós 1970 foi considerado por Moysés e Silva (2008) como o mais devastador para o Cerrado Brasileiro, tanto ambiental quanto socialmente. Neste período, ocorreu a inserção internacional do mercado brasileiro e a evolução da mecanização e das tecnologias agrícolas relativas à adubação, irrigação do solo e descoberta de variedades de culturas mais adaptadas à região, dando início à abertura de novas áreas para a expansão da agricultura para produção de grãos e da pecuária de corte (MMA, 2011c).

Assim, a expansão da cultura da soja, introduzida na década de 1970 no Cerrado, ocorreu entre os anos de 1980 e 1990 (RIBERIO *et al.*, 2005) e apresentou correlação direta com o aumento do desmatamento da região. Neste período, indícios apontam que sua expansão deslocou a pecuária para áreas mais baratas com cobertura vegetal original, provocando mais desmatamento (MMA, 2011c). Entretanto, Brandão *et al.* (2006) sugerem que grande parte das novas áreas de cultivo de soja no Brasil tenha sido implantada em áreas de pastagens degradadas, mas não excluem a possibilidade de que áreas virgens de Cerrado também tenham servido de base para a expansão tão rápida da área plantada com soja entre os anos de 1999 e 2004.

Por sua vez, a abertura de novas áreas para implantação da pecuária de corte foi estimulada no Cerrado para promover o aumento da produção de carne bovina, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte, consideradas Zonas de Expansão da Fronteira Agropecuária no país à época. O Brasil, desde os anos 1970, destaca-se como um dos maiores produtores mundiais de carne bovina. Esta abertura sobre área de vegetação nativa se deu no contexto da utilização do sistema extensivo de produção, utilizando gramíneas exóticas adaptadas às condições edafoclimáticas da região e uso limitado de insumos, e de baixa produtividade, cerca de uma cabeça de gado por hectare (MMA, 2010). Parte dessas áreas desmatadas foi abandonada em virtude da ocupação de solos impróprios e uso de técnicas inadequadas de manejo das pastagens, induzindo o desmatamento de novas áreas para a manutenção do rebanho bovino (QUEIROZ, 2009).

A partir da década de 1990, a ocupação foi marcada por políticas públicas com caráter mais restritivo, passando a ocupar a agenda ambiental, inicialmente nas instituições acadêmicas e, posteriormente, nas governamentais. Neste período, ocorre um primeiro debate sobre a conservação das áreas remanescentes do bioma, com o intuito de desenvolver tecnologias para a utilização adequada dos recursos hídricos, extração de produtos vegetais nativos e criadouros de animais silvestres e outras decisões que promovessem o desenvolvimento sustentável da região (MOYSÉS; SILVA, 2008).

A partir daí, diversas foram as iniciativas de mapear a perda de área e vegetação remanescente do Cerrado Brasileiro, empregando diferentes fontes de dados e abordagens metodológicas (MACHADO *et al.*, 2004; SANO *et al.*, 2008; MMA, 2009; 2011a; b; 2015b).

Dentre estas, o Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO), parceria entre o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Banco Mundial (BM), estimou o total acumulado de desmatamento no Cerrado até o ano de 2002 utilizando imagens de satélite. Calculou-se que cerca de 80 milhões de hectares já haviam sido desmatados, ou seja, 39% da área original do bioma (SANO *et al.*, 2008).

Para o mesmo período, um estudo da organização não governamental (ONG) Conservação Internacional - Brasil (CI - Brasil), revelou que a área desmatada do Bioma Cerrado correspondia a 54,9% da área original (MACHADO *et al.*, 2004). De acordo com Sano *et al.* (2008) as estimativas obtidas nos dois estudos apresentam diferenças devido à adoção de distintos conceitos de vegetação natural, resolução espacial das imagens utilizadas e diferenças na delimitação do bioma.

Após estas iniciativas, o MMA juntamente com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), promoveram a detecção dos desmatamentos no Bioma Cerrado em todo o Brasil, através do Projeto de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite: Cerrado (PMDBBS - Cerrado). Até o momento foram publicados quatro relatórios técnicos, o primeiro compreendendo o desmatamento acumulado até 2002 e os detectados entre 2002 a 2008 (MMA, 2009), o segundo o período entre 2008 e 2009 (MMA, 2011a), terceiro o período entre 2009 e 2010 (MMA, 2011b) e o último, e mais recente, entre 2010 e 2011 (MMA, 2015b).

No primeiro relatório técnico divulgado, dois períodos distintos foram avaliados. O primeiro período recuperou os dados de desmatamento detectado até o ano de 2002 do PROBIO enquanto o segundo os detectados entre 2002 e 2008. O desmatamento estimado até o ano de 2002 foi de 890.636 km<sup>2</sup>, ou seja, 43,67% da área total que o bioma inicialmente recobria (2.039.386 km<sup>2</sup>) haviam sido desmatadas até o referido ano. Com relação à estimativa realizada para o período entre 2002 e 2008, os resultados mostraram que a cobertura vegetal original e secundária do Bioma Cerrado foi reduzida em, aproximadamente, 7,5%. Isso implica na redução da cobertura original de 1.136.521 km<sup>2</sup> em 2002 para 1.051.182 km<sup>2</sup> em 2008. A taxa anual de desmatamento para o segundo período foi de, aproximadamente, 14.200 km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup> (MMA, 2009). A distribuição das áreas desmatadas e dos remanescentes por estados federativos são apresentados na Figura 2.2.

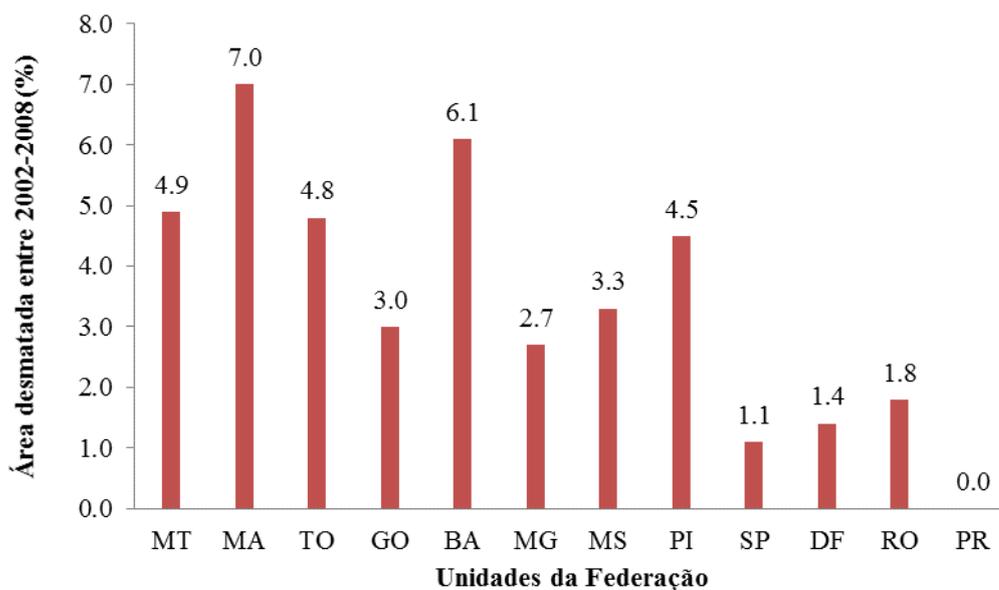


Figura 2.2 - Percentual de área desmatada no Cerrado, por Unidade Federativa, para o período 2002-2008.

Fonte: MMA (2009).

Já o segundo relatório técnico, apresentou o monitoramento e mapeamento do desmatamento detectado no bioma entre os anos de 2008 e 2009. Os resultados deste estudo demonstraram que a área de remanescentes, composta pela vegetação nativa e massas de água, passou de 51,6% em 2008 para 51,16% em 2009, em relação à área total do bioma. Neste período, foi identificada a supressão de 7.637 km<sup>2</sup> de vegetação nativa original e secundária dentro dos limites do bioma. Os estados que mais desmataram neste período foram: Maranhão (MA), Tocantins (TO), Bahia (BA), Mato Grosso (MT) e Piauí (PI) (MMA, 2011a).

Estabelecendo uma comparação com os dados de monitoramento realizado pelo Projeto Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES) (INPE, 2016) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o total de desmatamento na Amazônia Legal no mesmo período (2002-2008) foi de 111.030 km<sup>2</sup> enquanto que no Cerrado foi de 85.074 km<sup>2</sup> (MMA, 2009; INPE, 2016).

Embora o desmatamento na Amazônia apresente um valor ligeiramente maior, o bioma ocupa aproximadamente o dobro de área do Cerrado e apresenta taxa de desmatamento anual maior que na Amazônia, evidenciando o grau de ameaça deste bioma e reafirmando

a necessidade de esforços para redução do desmatamento no bioma. Uma vez mantidos os níveis atuais de desmatamento do Cerrado, o bioma passa a assumir papel de maior destaque nas emissões nacionais de gases de efeito estufa (MMA, 2011c).

Com a publicação do terceiro relatório de monitoramento do desmatamento no Cerrado foi constatado que a área de vegetação natural remanescentes de vegetação do Cerrado passou de 51,16% (1.043.346,02 km<sup>2</sup>) em 2009 para 1.036.877 km<sup>2</sup> (50,84%) em 2010. Neste período, 6.469 km<sup>2</sup> de vegetação nativa foram suprimidos representando perda de 0,32% no período de 2009 a 2010. As unidades federativas que mais desmataram sua vegetação nativa foram: Piauí, Maranhão, Bahia, Tocantins e Mato Grosso. Esta redução representa 16% em comparação ao período 2008-2009 e, quando comparada às médias anteriores - entre 2002 e 2009 - redução de 40% nos desmatamentos. Destaca-se o desmatamento realizado pelos estados do Maranhão e o Piauí que, neste ano, desmataram o equivalente a 1% de todo o seu território (MMA, 2011b).

A Figura 2.3 apresenta as estimativas de desmatamento no Cerrado, em percentagem, por Unidade Federativa, para os períodos 2002-2008, 2008-2009 e 2009-2010. Para o primeiro período, o valor foi obtido pela média anual da área desmatada entre os anos de 2002 e 2008.

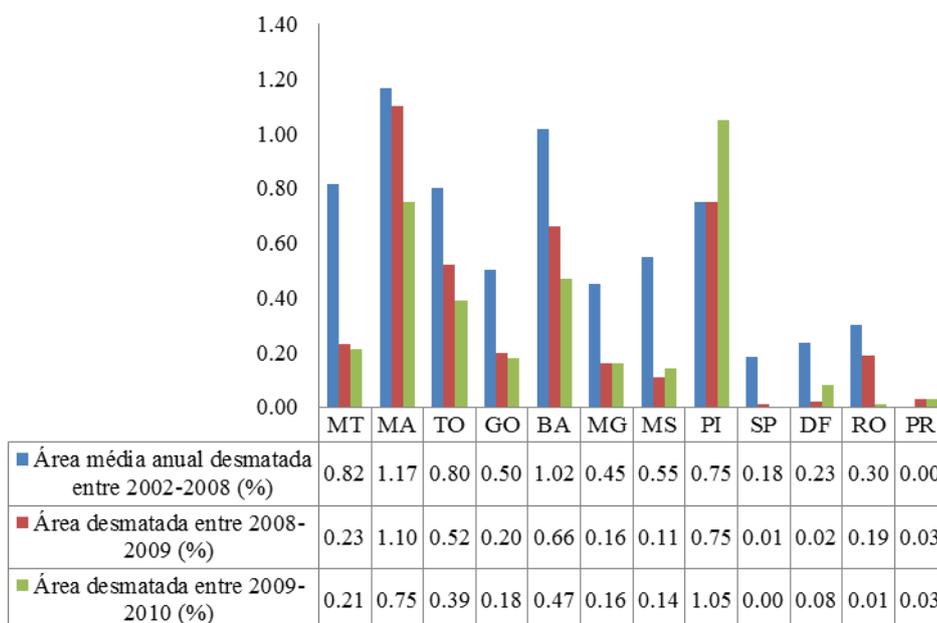


Figura 2.3 - Desmatamento no Cerrado, por Unidade Federativa, para os períodos 2002-2008 (média anual), 2008-2009 e 2009-2010.

Fonte: adaptada de MMA (2009), MMA (2011a) e MMA (2011b).

Mediante a comparação das percentagens de área desmatadas ao longo dos anos, se observa os estados do Maranhão, Piauí, Bahia, Mato Grosso e Tocantins representam os estados que mais desmataram áreas de Cerrado em todos os períodos estudados. Estes estados encontram-se incluídos em uma região conhecida nos anos 1990 como MAPITO e atualmente conhecida como MATOPIBA. Esta responde pela maior parte do desmatamento registrado no Cerrado, sendo o cultivo de culturas destinadas à produção de bicomcombustível, como a cana-de-açúcar, a ameaça mais recente a manutenção dos remanescentes florestais (MMA, 2011c).

Atualmente, diferentes fatores econômicos, políticos e territoriais e socioambientais são apontados como causas críticas do desmatamento no Cerrado. Dentre eles, destaca-se o uso ilegal da vegetação nativa para produção de carvão vegetal e lenha; impunidade dos ilícitos ambientais; existência de áreas subutilizadas, degradadas e abandonadas; baixo percentual de áreas protegidas (Unidades de Conservação (UCs) e Terras Indígenas (TIs)) além do baixo reconhecimento do valor dos serviços ambientais (MMA, 2011c).

Estes fatores determinam a magnitude e distribuição dos novos desmatamentos no Cerrado. Rocha *et al.* (2011) analisaram a distribuição espacial dos desmatamentos no Cerrado para o período de 2002 a 2009 visando entender os processos de transformação em curso no bioma. Constataram que 70% dos alertas de desmatamento no período se concentraram em apenas 100 municípios e ocorreram, principalmente, em áreas de vegetação densa e relevo predominantemente plano, propícios ao avanço da agricultura mecanizada e, com menor intensidade, da pecuária extensiva. A tendência de mudança da fronteira agropecuária para áreas com vegetação mais densa, ou seja, com maior quantidade de biomassa no Cerrado, também foi observada nos resultados obtidos por Aguiar *et al.* (2012) para a Amazônia brasileira. Além destas constatações, Rocha *et al.* (2011) identificaram duas grandes frentes de expansão agropecuária. A primeira abrange o sudeste do estado de Mato Grosso, estendendo-se pelo leste do estado de Mato Grosso do Sul. A segunda, parte do oeste do estado da Bahia se estende pelo oeste do estado do Piauí, sul do estado do Maranhão e, com menor intensidade, pelo oeste de Minas Gerais (Figura 2.4).

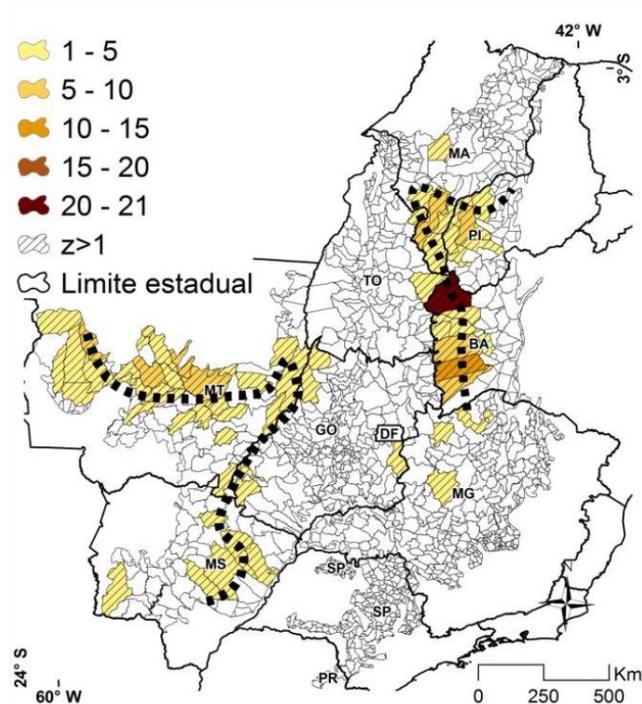


Figura 2.4 - Mapa dos municípios com valores Z (desmatamento total - desmatamento médio / desvio padrão) igual ou maior que 1 desvio padrão, indicando as novas frentes de desmatamento no Cerrado Brasileiro.

Fonte: Rocha *et al.* (2011).

De acordo com observações de campo realizadas no mesmo estudo, Rocha *et al.* (2011) reconheceram que o atual desmatamento ocorrido no Mato Grosso, oeste da Bahia e sudeste de Goiás estão relacionados à expansão agrícola enquanto que o ocorrido no norte do estado de Goiás se relaciona à produção de carvão vegetal, extração mineral e à pecuária. Segundo estudo do MMA (2011c), a parte norte do Cerrado, apesar de apresentar baixa densidade populacional, passa por um processo de expansão agrícola para plantio de grãos, principalmente no sul do Maranhão e do Piauí e no norte do Tocantins. Já no oeste baiano, o cultivo de soja é, atualmente, o principal vetor de desmatamento. Adicionalmente, foi identificado que no Triângulo Mineiro, as pastagens têm cedido seu lugar para o cultivo de cana-de-açúcar, ocorrendo em classificados pelo MMA como de prioridade “muito alta para conservação ambiental”. Desta forma, as lavouras de cana-de-açúcar estão tomando importantes áreas do Cerrado que deveriam ser protegidas para a conservação e uso sustentável da biodiversidade. A demanda por cana-de-açúcar afeta mais o Cerrado que outros biomas brasileiros, como o Pantanal e Amazônia, uma vez que a

expansão de áreas nestes últimos foi vetada pelo Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (ZAE - Cana-de-açúcar) (EMBRAPA, 2007).

O desmatamento observado no norte de Goiás relacionado à produção de carvão vegetal afeta outras regiões do bioma (ROCHA *et al.*, 2011). De acordo com o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado - PPCerrado (MMA, 2011c), uma expressiva parte do carvão vegetal utilizado pelas indústrias siderúrgicas é proveniente do desmatamento ilegal de área do Cerrado, principalmente dos estados de Goiás, Tocantins e Bahia. Grandes áreas de Cerrado em Minas Gerais, no Maranhão e sul do Piauí, também são alvo de desmatamento para a produção de carvão vegetal que alimentam as indústrias de ferro gusa (DIAS *et al.*, 2008).

As novas frentes agropecuárias aqui discutidas representam o dinamismo existente no Cerrado. Portanto, é necessário que áreas críticas e sensíveis sejam conservadas, no que se refere à biodiversidade e recursos hídricos e garantir sua utilização por populações tradicionais. Esta condição, sobretudo, revela a necessidade de adotar medidas de intervenção em prol da conservação deste bioma, através de políticas de proteção da biodiversidade, bem como, através um modelo de desenvolvimento alternativo, capaz de promover o crescimento econômico regional de forma sustentável (MMA, 2011c). Dentro deste contexto, o Ministério do Meio Ambiente publicou a Portaria MMA nº. 92/2012. Esta Portaria lista municípios situados no Bioma Cerrado que serão alvos de medidas e ações prioritárias de monitoramento e controle do desmatamento ilegal, ordenamento territorial e incentivo a atividades econômicas ambientalmente sustentáveis, manutenção de áreas nativas e recuperação de áreas degradadas, uma vez que apresentaram elevado índice de desmatamento. Os municípios listados por estado da federação são:

- Bahia: Barreiras, Cocos, Correntina, Formosa do Rio Preto, Jaborandi, Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves e São Desidério;
- Goiás: Caiapônia, Cristalina e Crixás;
- Maranhão: Aldeias Altas, Alto Parnaíba, Balsas, Barra do Corda, Barreirinhas, Buriti, Caxias, Chapadinha, Codó, Coroatá, Grajaú, Parnarama, Riachão, Santa Quitéria do Maranhão, São Benedito do Rio Preto, São João do Soter, Timbiras, Tuntum, Urbano Santos e Vargem Grande;

- Mato Grosso: Água Boa, Cocalinho, Paranatinga e Rosário Oeste;
- Mato Grosso do Sul: Porto Murtinho;
- Minas Gerais: Buritizeiro e João Pinheiro;
- Piauí: Baixa Grande do Ribeiro, Currais, Palmeira do Piauí, Ribeiro Gonçalves, Santa Filomena e Uruçuí; e
- Tocantins: Lagoa da Confusão, Mateiros, Natividade, Palmeirante, Paranã, Peixe, Pium, Santa Rita do Tocantins.

Considerando o potencial de emissão, o desmatamento no Cerrado apresentou alta participação nas emissões nacionais de gases de efeito estufa, diagnosticada por dados do 2º Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2010b). As estimativas demonstram que dos 203.953.330 ha mapeados do Bioma Cerrado, em 26.259.331 ha (12,9%) houve mudança de uso da terra no período de 1994 a 2002, sendo que as emissões antrópicas líquidas totalizaram 2.421.459 Gg CO<sub>2</sub>.

## **2.2 Estimativas de emissão para o Cerrado**

As emissões de gases de efeito estufa provenientes da mudança de uso da terra são a principal fonte de emissão destes gases no Brasil, sendo o desmatamento responsável por aproximadamente 70% do total de emissões CO<sub>2</sub> (WINKLER, 2007). A liberação de CO<sub>2</sub> para atmosfera devido à supressão e queima da vegetação florestal, afeta os estoques de carbono e, conseqüentemente, o balanço de carbono nos ecossistemas terrestres (FEARNSIDE, 1996). Nas últimas décadas, diversos estudos objetivaram realizar estimativas precisas de emissão de carbono provenientes de mudanças da cobertura da terra associadas ao desmatamento em regiões tropicais por meio de modelos de emissões (FEARNSIDE, 2000; DEFRIES *et al.*, 2002; HOUGHTON, 2003; ACHARD *et al.*, 2004; AGUIAR *et al.*, 2012).

Nestes modelos, são representadas as emissões de CO<sub>2</sub> originárias de diversos processos associados ao desmatamento como: a remoção da cobertura vegetal original e queima da remanescente; a decomposição da biomassa florestal abandonada no solo na consolidação de áreas de pastagens e agricultura; ao estabelecimento da vegetação secundária após o abandono agrícola e seu posterior desmatamento, a perda de carbono do solo após o

desmatamento; a degradação florestal e a ocorrência de incêndios excepcionais (ACHARD *et al.*, 2004). Entretanto, as estimativas de cálculo de emissão dos modelos existentes sempre estão associadas a alguma fonte de incerteza e consideram áreas de florestas tropicais, não existindo estudos específicos para o Cerrado. Estas fontes de incertezas serão abordadas mais detalhadamente na seção 2.2.1. Posteriormente, na seção 2.2.2 é detalhado o arcabouço de modelagem INPE-EM assim como sua aplicabilidade para cálculos de estimativas de emissões de carbono por desmatamento no Cerrado.

Embora haja uma notada evolução na representação dos processos de emissão de CO<sub>2</sub> nos estudos analisados, os modelos ainda apresentam inúmeras incertezas e diferenças metodológicas. Dentro deste contexto, Ramankutty *et al.* (2007) analisaram diferentes estimativas e conjuntos de dados, suposições e metodologias utilizados em estimativas de emissões de carbono por desmatamento em áreas tropicais, com o objetivo de definir os principais esforços para melhoria da precisão e comparabilidade destes. Apontam que os cinco estudos existentes analisados não podem ser diretamente comparados e sugerem, de acordo com os resultados das simulações realizadas para a Amazônia legal, diretrizes para estudos futuros de emissões globais de carbono por mudança de uso da terra. Além da utilização de conjuntos de dados mais confiáveis de desmatamento e biomassa para avaliar o impacto das incertezas e erros sobre as estimativas, novos estudos devem considerar a dinâmica durante e após o processo de desmatamento, incluir o histórico de mudança da cobertura da terra de forma explícita e estimar com precisão os caminhos de emissão do carbono removido no corte na atmosfera.

Ao analisar as incertezas no modelo *INPE-Emission Model* (INPE-EM) aplicado à Amazônia brasileira, Aguiar *et al.* (2012) chamam a atenção para o impacto de diferentes fontes de estimativas de biomassa, tanto em termo de magnitude quanto de distribuição espacial, na estimativa de emissões de carbono por desmatamento. Segundo o estudo, as diferenças influenciaram de forma direta o valor médio calculado de AGB e, conseqüentemente o cálculo de emissões. Outra fonte significativa de incerteza apontada no trabalho foi a quantidade de madeira retirada pelo setor florestal nas áreas desmatadas. Informações oficiais do setor florestal sobre a quantidade de madeira extraída não correspondem à realidade devido ao desmatamento ilegal não autorizado pelos órgãos reguladores e à extração seletiva de madeira. Contudo, avaliam que os parâmetros que apresentam mais incerteza no modelo são a quantidade de biomassa que permanece após a

exploração madeireira que será queimada no ano de corte e, conseqüentemente, o quanto é abandonado no solo para decomposição biológica. De acordo com os autores, estes parâmetros são influenciados pela eficiência do fogo e pelo sistema de uso da terra dominante e capital disponível, sendo cruciais para as estimativas uma vez que alteram as taxas de emissões de carbono (RAMANKUTTY *et al.*, 2007).

Adicionalmente, Aguiar *et al.* (2012) sugerem que uma questão fundamental na redução das incertezas apresentadas nos modelos existentes é a disponibilidade de informações confiáveis, especialmente distribuídas sobre as áreas desmatadas e a biomassa. Neste aspecto, apontam a necessidade de retratar a heterogeneidade biofísica e socioeconômica da região investigada uma vez que as características biofísicas, a história de ocupação e aspectos socioeconômicos, políticos e institucionais definem a remoção ou exploração da vegetação, assim como a inclusão do uso da vegetação secundária no sistema de produção adotado.



### 3 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Neste capítulo, são detalhadas a área de estudo (Seção 3.1) e o processo de construção do banco de dados espacialmente explícito, que irá servir de base para os Capítulos 3 e 4, nos quais os métodos específicos empregados nas análises dos Capítulos 4 e 5 são detalhados.

#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho compreende toda a continuidade do Bioma Cerrado (Figura 3.1), correspondendo a uma área de aproximadamente 2 mi km<sup>2</sup>, ou aproximadamente 22 % do território brasileiro (IBGE, 2004a).

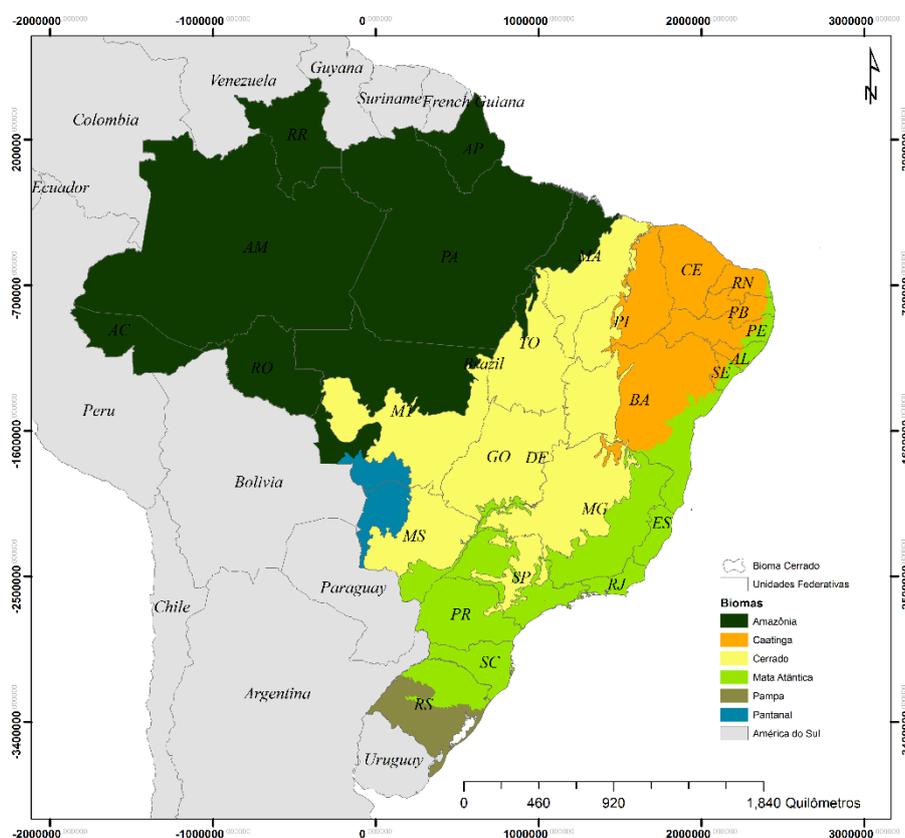


Figura 3.1 - Mapa de localização do Cerrado e demais biomas em relação aos limites das Unidades Federativas.

Fonte: IBGE (2004).

O Cerrado é caracterizado por uma forte sazonalidade, com estações seca e úmida bem definidas. A precipitação média anual varia de 800 a 2.000 mm e está concentrada no período do verão, entre os meses de outubro e abril (RATTER *et al.*, 1997). Durante a estação seca, a ocorrência de incêndios naturais é comum, como o é na maioria das

formações savânicas. Entretanto, o aumento do uso do fogo para a limpeza de áreas e manejo agrícola (*clearing and agricultural management*) tem alterado os regimes naturais, com consequências na estrutura da vegetação (MIRANDA *et al.*, 2002; PIVELLO, 2011). Os solos são bem drenados, usualmente distróficos (ácidos), com baixa fertilidade e alta concentração de alumínio. Como resultado, a vegetação do Cerrado está adaptada à sazonalidade, infertilidade, solos tóxicos e dependente-adaptado à ocorrência do fogo (MMA, 2011c).

O termo Cerrado (*Lato sensu*) envolve uma considerável variação fisionômica, com tipos de vegetação classificadas de acordo com a presença de camadas de vegetação (por exemplo, gramíneas, arbustos e árvores), cobertura de copa e inserção na paisagem. Normalmente, o Cerrado típico (*Stricto sensu*) ocupa os interflúvios bem drenados, enquanto florestas de galeria mais densas seguem os cursos de água e florestas estacionais estão presentes em áreas de solos mais férteis (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 2002). A biomassa acima do solo (AGB - *above ground biomass*, na sigla em Inglês) aumenta proporcionalmente à densidade da vegetação lenhosa e é maior em florestas sazonais. A proporção de abaixo do solo a biomassa da vegetação acima do solo diminui de pastos para as florestas sazonais (MIRANDA *et al.*, 2014). A razão biomassa abaixo do solo em relação à biomassa acima do solo diminui das gramíneas para as florestas sazonais (MIRANDA *et al.*, 2014).

Com exceção do oeste do estado de São Paulo, o núcleo do Bioma Cerrado permaneceu relativamente isolado até a primeira metade do século XX. Entretanto, a construção de Brasília na década de 1.960 e de uma rede de estradas conectando os principais mercados ao interior do Brasil, combinados com programas governamentais na década de 1970, promoveram a ocupação e o desenvolvimento da agricultura na região. As propriedades rurais localizadas no Cerrado receberam mais créditos para a produção agrícola do que qualquer outra região no país (KLINK; MOREIRA, 2002). A região apresentou as condições ideais para acomodar a crescente demanda nacional e mundial por grãos e, portanto, aumento nos subsídios e melhoria nas pesquisas foram implantados para sustentar a agricultura comercial de larga escala.

A topografia plana, solos bem drenados e disponibilidade de terra fez o Cerrado ocidental extremamente adequado para a expansão da agricultura mecanizada. Expansão da fronteira agrícola em direção ao Cerrado ocidental cravado durante a década de 1990 devido aos

preços internacionais das commodities favoráveis, o que tornou Mato Grosso o maior produtor nacional de soja (IBGE, 2014). A topografia plana, solos bem drenados e a disponibilidade de terras fizeram o oeste do Cerrado extremamente adequado para a expansão da agricultura mecanizada. A expansão da fronteira agrícola em direção à porção ocidental do Cerrado disparou durante a década de 1990 devido ao preços internacionais das *commodities* favorável, o que tornou o Mato Grosso o estado maior produtor nacional de soja (IBGE, 2014). A expansão das culturas no Cerrado ocorreu à custa de pastagens plantadas dedicadas ao pastejo e da supressão de áreas naturais ocupadas anteriormente por formações campestres, savânicas e florestais.

Um relatório publicado recentemente mostrou que em 2013, o Cerrado contava com cerca de 54% de sua área coberta com vegetação natural. Paisagens agropecuárias ocupavam 41% do bioma, tendo as pastagem plantadas como principal cobertura da terra (29,5%) (MMA, 2015a). Os estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul foram os que apresentavam as menores áreas remanescentes de cobertura natural, cobrindo menos de 40% da área natural original (MMA, 2015a).

### **3.2 Construção dos bancos de dados**

Foi criando um banco de dados espacialmente explícito onde a área de estudo foi decomposta em 85.379 células regulares de 5 x 5 km (25 km<sup>2</sup>), cobrindo toda a extensão do bioma (Figura 3.2). Neste banco de dados, as informações coletadas de diversas fontes foram utilizadas para o preenchimento dos atributos das células.

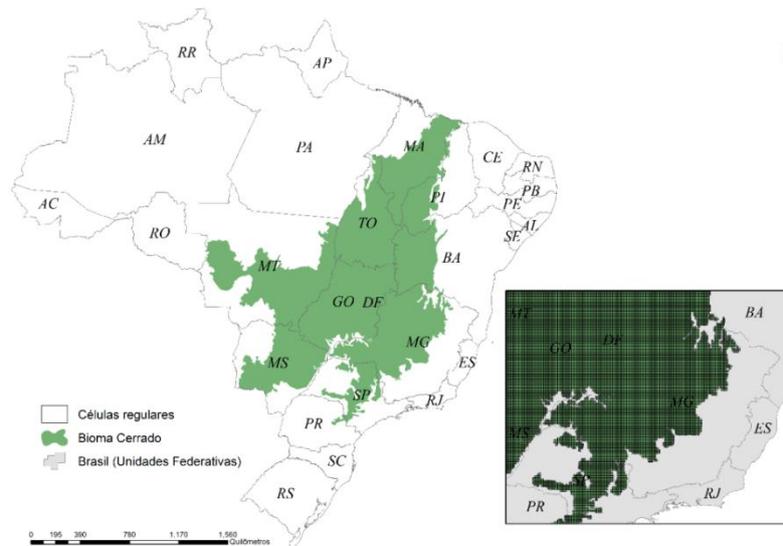


Figura 3.2 - Área de estudo dividida em células regulares de 5 x 5 km no estado de Minas Gerais.

Fonte: Produção do autor.

### 3.2.1 Dados de desmatamento

O conhecimento sistemático das mudanças de uso da terra para o Cerrado ainda é muito limitado (BEUCHLE *et al.*, 2015). Enquanto a Amazônia tem um programa de monitoramento que gera informação multitemporal e espacialmente explícita consistente de desmatamento desde a década de 1980 (INPE, 2016), apenas no início da década de 2000 que a primeira tentativa de mapear a vegetação natural para todo o Cerrado foi realizada (SANO *et al.*, 2008).

Neste contexto, o Projeto PROBIO (Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira) (SANO *et al.*, 2008) produziu um mapa de base do uso e cobertura da terra no Cerrado para o ano de 2002, baseado em imagens Landsat com 30 metros de resolução espacial. No presente trabalho, este mapa forneceu informação sobre o desmatamento acumulado até o ano de 2002 e será a partir de agora chamado de mapa PROBIO (Figura 3.3b).

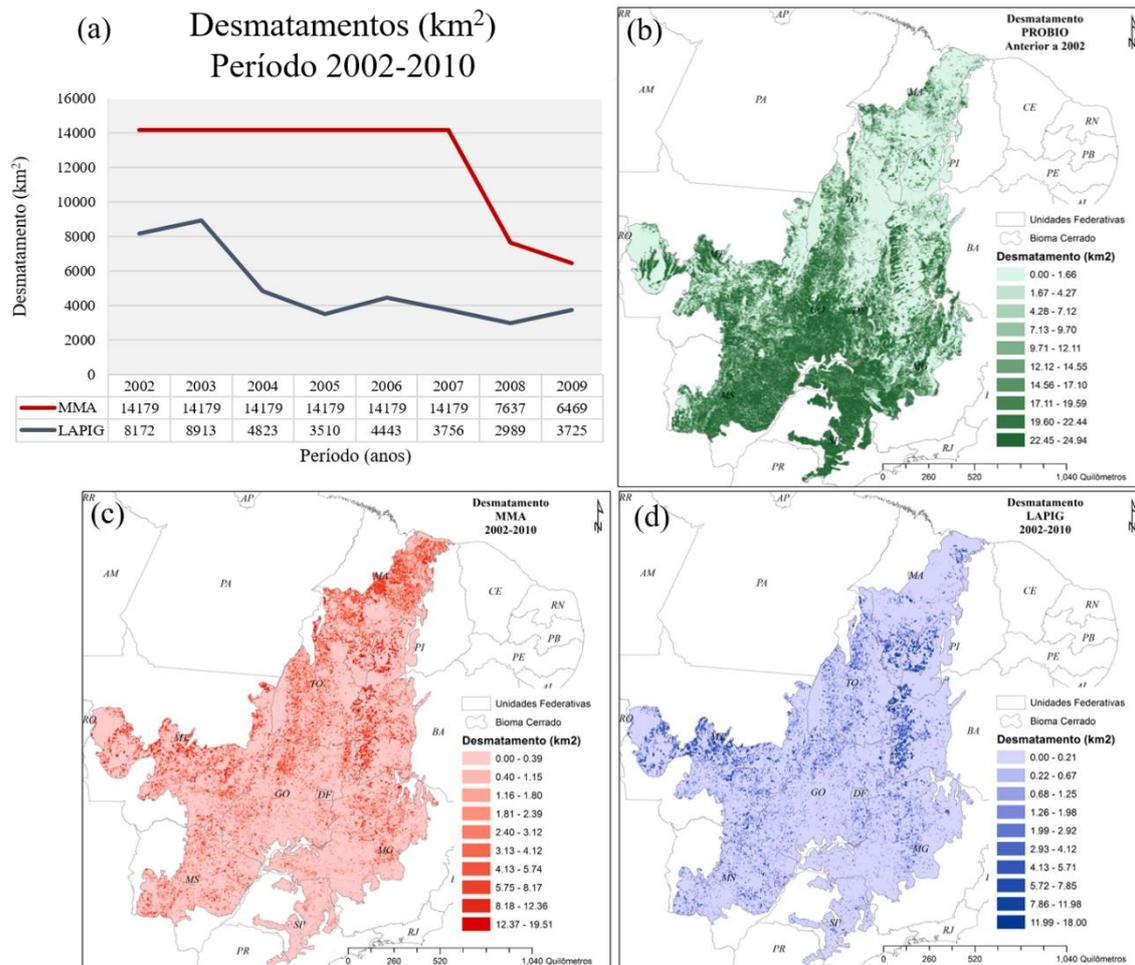


Figura 3.3 - (a) Evolução das taxas anuais de desmatamento (MMA e LAPIG); (b) desmatamento acumulado até o ano de 2002; (c) desmatamento entre 2002 e 2010 de acordo com os dados do MMA; (d) desmatamento entre 2002 e 2010 de acordo com os dados do LAPIG.

Fonte: Produção do autor.

O mapa PROBIO foi utilizado como base para identificar as perdas de vegetação nos anos seguintes, em um projeto conduzido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) denominado Projeto Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite (PMDDBS). Assim, o Ministério do Meio Ambiente publicou atualizações para os anos de 2008, 2009 e 2010, considerando estes como os dados oficiais para determinar as trajetórias do desmatamento no Bioma Cerrado. Neste trabalho as atualizações para os anos de 2008, 2009 e 2010 são chamadas de mapas MMA. A avaliação da validação foi realizada utilizando imagens de satélite de alta resolução espacial e indicaram uma acurácia de 95%, 96% e 95% para os anos de 2008, 2009 e 2010, respectivamente (MMA,

2009; 2011a; b). O desmatamento acumulado no período 2002-2010 mapeado pelo MMA é apresentado na Figura 3.3c.

A segunda fonte de desmatamento foi provida pelo Sistema de Integrado de Alertas de Desmatamentos (SIAD), desenvolvido pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás (UFG) (FERREIRA *et al.*, 2007) (Figura 3.3d). O sistema fornece informação anual espacialmente explícita do desflorestamento e compreende o período de 2003 a 2015. O mapeamento pelo SIAD foi desenvolvido com a utilização de imagens de média resolução espacial (MODIS - MOD13Q1) e validado utilizando imagens Landsat e CBERS. A avaliação de campo indicou uma taxa de sucesso para o SIAD de 79% (FERREIRA *et al.*, 2009).

### 3.2.2 Dados de vegetação e biomassa

Para representar a heterogeneidade estrutural do Cerrado brasileiro, foi necessário identificar e localizar espacialmente os diferentes tipos de formação vegetacional presentes no bioma. A partir do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004b) (Figura 3.4), foram identificados os 28 diferentes tipos fitofisionômicos e reagrupados nos três grupos propostos por Ribeiro e Walter (2008): formações campestres, savânicas e florestais.

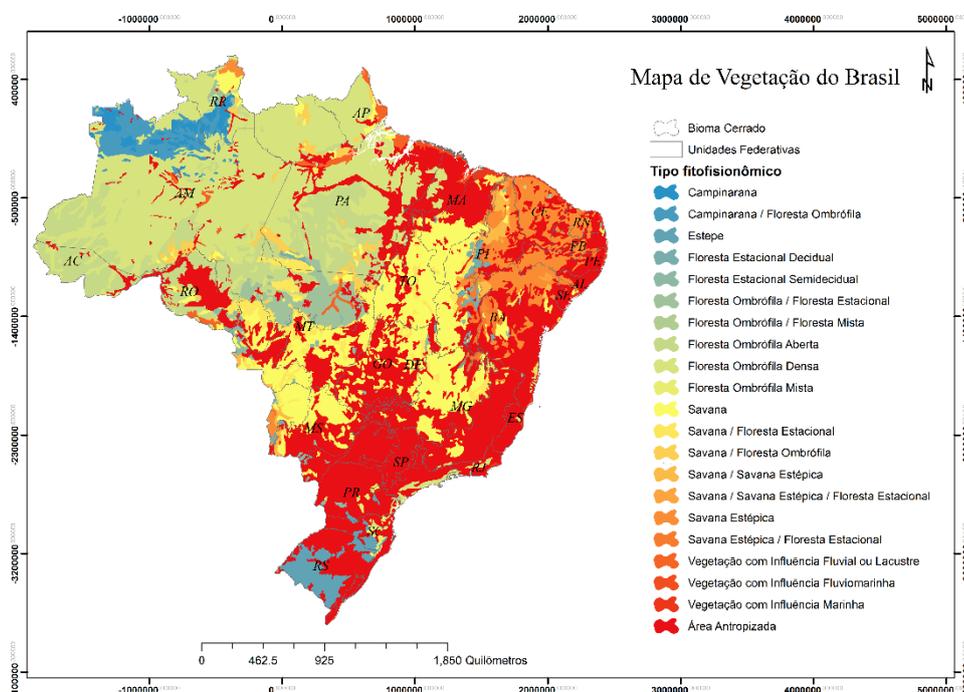


Figura 3.4 - Mapa de Vegetação do Brasil.

Fonte: adaptada de IBGE (2004b).

A Tabela 3.1 mostra o reagrupamento feito nos 28 tipos fitofisionômicos presentes nos limites do Bioma Cerrado nos três grupos de formação vegetacional propostos por Ribeiro e Walter (2008), de acordo com o Mapa da vegetação do Brasil (IBGE, 2004b). A Tabela mostra também as contribuições percentuais de cada tipo e formação na área total do bioma.

Tabela 3.1 - Reagrupamento dos tipos fitofisionômicos em três classes de formação vegetacional (formações campestres, savânicas e florestais) e suas respectivas porcentagens de área no bioma.

<b>Tipo fitofisionômico (IBGE, 2004)</b>	<b>% do bioma</b>	<b>Formação Vegetacional (Ribeiro e Walter, 2008)</b>	<b>% do bioma</b>
Refúgio Montano	0,0		
Savana Gramíneo-Lenhosa	9,9	Campestres	10,2
Savana Estépica Gramíneo Lenhosa	0,1		
Savana Estépica Parque	0,1		
Estepe Arborizada	0,0	Savânicas	55,2
Savana Arborizada	29,5		
Savana Estépica Arborizada	0,9		
Savana Parque	24,9		
Floresta Ombrófila Aberta Aluvial	0,0		
Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas	1,3		
Floresta Ombrófila Aberta Submontana	0,6		
Floresta Estacional Decidual Terras Baixas	0,0		
Floresta Estacional Decidual Montana	1,1		
Floresta Estacional Decidual Submontana	2,6		
Floresta Ombrófila Densa Aluvial	0,0		
Floresta Ombrófila Densa Montana	0,0		
Floresta Ombrófila Densa Submontana	0,2		
Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	2,9		
Floresta Estacional Semidecidual de terras baixas	0,1	Florestais	34,6
Floresta Estacional Semidecidual Montana	3,6		
Floresta Estacional Semidecidual Submontana	11,9		
Floresta Ombrófila Mista Alto Montana	0,0		
Floresta Ombrófila Mista Montana	0,1		
Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre	0,3		
Pioneiras com influência fluviomarinha (mangue)	0,1		
Pioneiras com influência Marinha (restinga)	0,3		
Savana Florestada	9,3		
Savana Estépica Florestada	0,2		

Fonte: Produção do autor.

As formações classificadas como campestres foram as com menor percentual de cobertura original, 10,2% do Cerrado. As formações savânicas originalmente possuíam a maior área distribuída no bioma, cerca de 55,2%. Embora com um maior número fitofisionômico, as formações florestais representam uma menor área em relação às savânicas, com aproximadamente 34,6% da cobertura da região.

Este reagrupamento de fitofisionomias resultou em um novo mapa com as três classes de formação vegetacional: campestres, savânicas e florestais, conforme apresentado na Figura 3.5.

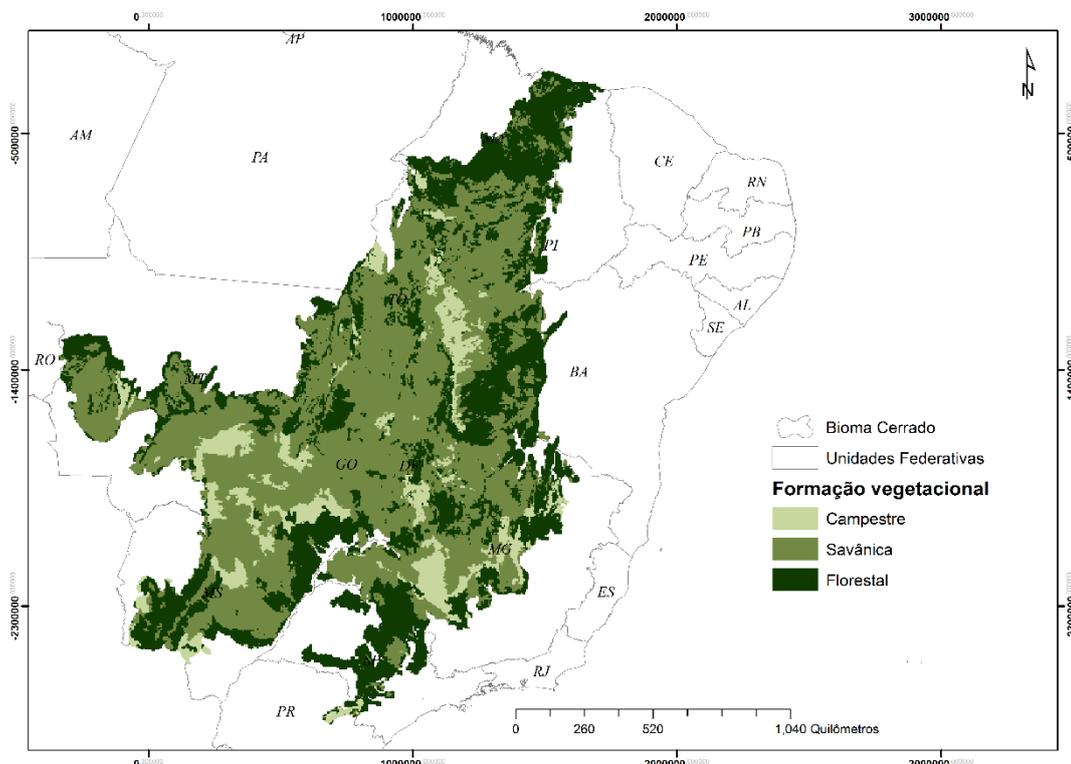


Figura 3.5 - Mapa de formações vegetacionais presentes no Cerrado Brasileiro.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 3.5 mostra que, as formações campestres ocupam sobretudo regiões do oeste e norte de Minas Gerais, leste e centro-oeste de Goiás, oeste da Bahia, leste do Tocantins, sudeste do Mato Grosso e região central do Mato Grosso do Sul. As formações savânicas estão distribuídas ao longo de todo o bioma, principalmente na porção central deste. Já as formações florestais estão distribuídas maiormente na fração do bioma que ocupa o estado de São Paulo, do norte de Minas Gerais, oeste da Bahia, nordeste do Maranhão, sul de Goiás e sudoeste do Mato Grosso do Sul.

Como fonte de informação sobre biomassa foi utilizado o mapa de biomassa produzido para a “Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima” (MCT, 2010b). A partir dele foram extraídos os valores de biomassa acima do solo (AGB), mostrados na Figura 3.6. Os demais dados de biomassa utilizados foram dados não espacializados e obtidos em literatura.

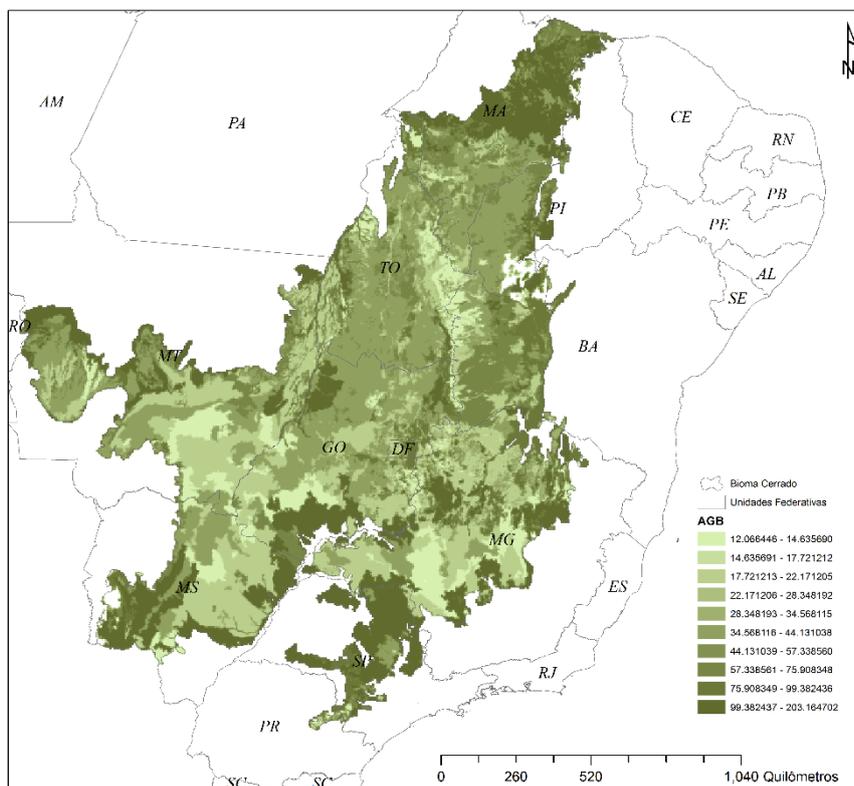


Figura 3.6 - Mapa de biomassa acima do solo (AGB) distribuída no Cerrado brasileiro.

Fonte: adaptada de MCT (2010b).

### 3.2.3 Fatores ambientais e socioeconômicos para análise de sub-regiões

Para caracterização das sub-regiões com processos de desmatamento e atores sociais semelhantes, o banco de dados espacialmente explícito recebeu informação de 34 variáveis socioeconômicas e 5 ambientais que representam fatores que podem, potencialmente, explicar a heterogeneidade intrarregional dos processos e atores envolvidos no desmatamento no Cerrado. O primeiro conjunto de variáveis compreendeu as relacionadas aos fatores ambientais. Já o segundo conjunto contou com as variáveis relacionadas aos aspectos socioeconômicos observados na região e foi agrupado em seis categorias: acessibilidade a mercados, atratividade econômica, demográficas, tecnológicas, estrutura

agrária e sociais e econômicas. A lista final de variáveis avaliadas para este estudo é apresentada na Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Categorias e variáveis no banco de dados celular (células de 5 x 5 km<sup>2</sup>), com suas respectivas descrições.

<b>Categoria</b>	<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>
Ambientais e climáticas	<i>env_altitude</i>	Altitude média
	<i>env_soil_moisture</i>	Umidade média do solo
	<i>env_sa_tree</i>	Porcentagem de cobertura arbórea
	<i>env_slope</i>	Inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal
	<i>env_hand</i>	Distância vertical em relação à drenagem mais próxima ( <i>Height Above Nearest Drainage - HAND</i> )
Acessibilidade a mercados	<i>mkt_dist_roads</i>	Distância euclidiana à rodovia mais próxima
	<i>mkt_dist_paved_roads</i>	Distância euclidiana à rodovia pavimentada mais próxima
	<i>mkt_dist_unpaved_roads</i>	Distância euclidiana à rodovia não pavimentada mais próxima
	<i>mkt_dist_urban</i>	Distância euclidiana ao centro urbano mais próximo
	<i>mkt_dist_rivers</i>	Distância euclidiana ao rio principal mais próximo
	<i>mkt_accessibility</i>	Tempo de viagem às maiores cidades
Atratividade econômica	<i>attract_dist_mineral</i>	Distância euclidiana ao depósito mineral mais próximo
	<i>attract_wood</i>	Quantidade produzida de madeira em tora em 2010
	<i>attract_firewood</i>	Quantidade produzida de lenha em 2010
	<i>attract_charcoal</i>	Quantidade produzida de carvão vegetal em 2010
	<i>attract_soy</i>	Quantidade produzida de soja em grãos em 2006
	<i>attract_sugar_cane</i>	Quantidade produzida de cana-de-açúcar em 2006
	<i>attract_corn</i>	Quantidade produzida de milho em 2006
	<i>attract_cotton</i>	Quantidade produzida de algodão em 2006
<i>attract_cattle_raising</i>	Efetivo de rebanho bovino em 2006	
Demográficos	<i>demo_dens</i>	Densidade demográfica em 2010
	<i>demo_urban</i>	Porcentagem da população urbana em 2010
	<i>demo_rural</i>	Porcentagem da população rural em 2010
	<i>demo_migr</i>	Porcentagem de migrantes em 2010

Tecnológicos	<i>tech_tractor</i>	Número médio de tratores por propriedade em 2006
	<i>tech_assistence</i>	Porcentagem de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao total de propriedades do município em 2006
Estrutura agrária	<i>agr_nr_small</i>	Porcentagem de pequenas, médias e grandes propriedades rurais em relação ao número total de propriedades do município
	<i>agr_nr_medium</i>	
	<i>agr_nr_large</i>	
	<i>agr_small</i>	Porcentagem de pequenas, médias e grandes propriedades rurais em relação à área total de propriedades do município
	<i>agr_medium</i>	
	<i>agr_large</i>	
	<i>agr_nr_familiar</i>	Porcentagem de propriedades rurais com agricultura familiar em relação ao número total de propriedades do município
	<i>agr_nr_unfamiliar</i>	Porcentagem de propriedades rurais com agricultura não familiar em relação ao número total de propriedades do município
<i>agr_familiar</i>	Porcentagem da área de propriedades com agricultura familiar em relação à área total de propriedades do município	
<i>agr_unfamiliar</i>	Porcentagem da área de propriedades com agricultura não familiar em relação à área total de propriedades do município	
Sociais e econômicos	<i>soc_literacy</i>	Porcentagem de pessoas com dez anos ou mais alfabetizadas
	<i>soc_renda_1</i>	Porcentagem da população com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, considerando a porcentagem que recebe apenas benefícios do governo
	<i>soc_renda_2</i>	Porcentagem da população com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, desconsiderando a porcentagem que recebe apenas benefícios governamentais

Fonte: Produção do autor.

As próximas Seções (3.2.3.1 até 3.2.3.7) descrevem como foi realizado o processo de agregação destas variáveis nas células e ilustram a distribuição espacial delas em cada categoria.

### **3.2.3.1 Fatores ambientais**

Foram incluídas no banco de dados seis variáveis ambientais e climáticas, a saber: altitude média (*env\_altitude*), média da umidade do solo (*env\_soil\_moisture*), a porcentagem de cobertura arbórea (*env\_sa\_tree*), inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal (*env\_slope*) e distância vertical em relação à drenagem mais próxima (*env\_hand*). As variáveis que representam a altitude média (Figura 3.7) e a inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal (Figura 3.10) foram preparadas com os dados do Projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008). Já a que representa a umidade média do solo (Figura 3.8) foi construída por meio de dados do CPTEC/INPE do ano de 2008 (INPE, 2013). Finalmente, a porcentagem de cobertura arbórea (Figura 3.9) foi elaborada com dados do estudo de Hansen *et al.* (2003) e a distância vertical em relação à drenagem mais próxima (Figura 3.11) no estudo de Rennó *et al.* (2008). Todas as variáveis foram construídas para representar a média do atributo em cada célula regular que cobre o bioma.

Mediante a análise da Figura 3.7, percebe-se que o Cerrado brasileiro apresenta em suas porções sul e leste as maiores altitudes médias em relação às demais regiões. O extremo sul do bioma, zona limítrofe entre os biomas Mata Atlântica e Pantanal, exhibe as maiores umidades médias do solo (Figura 3.8).

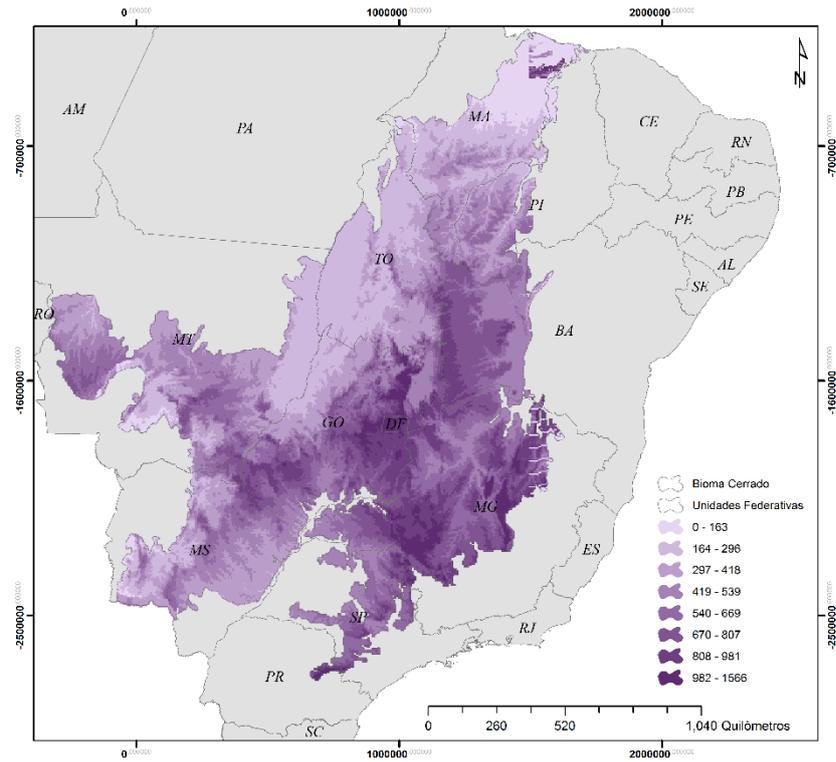


Figura 3.7 - Altitude média (metros) em células em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de Valeriano (2008).

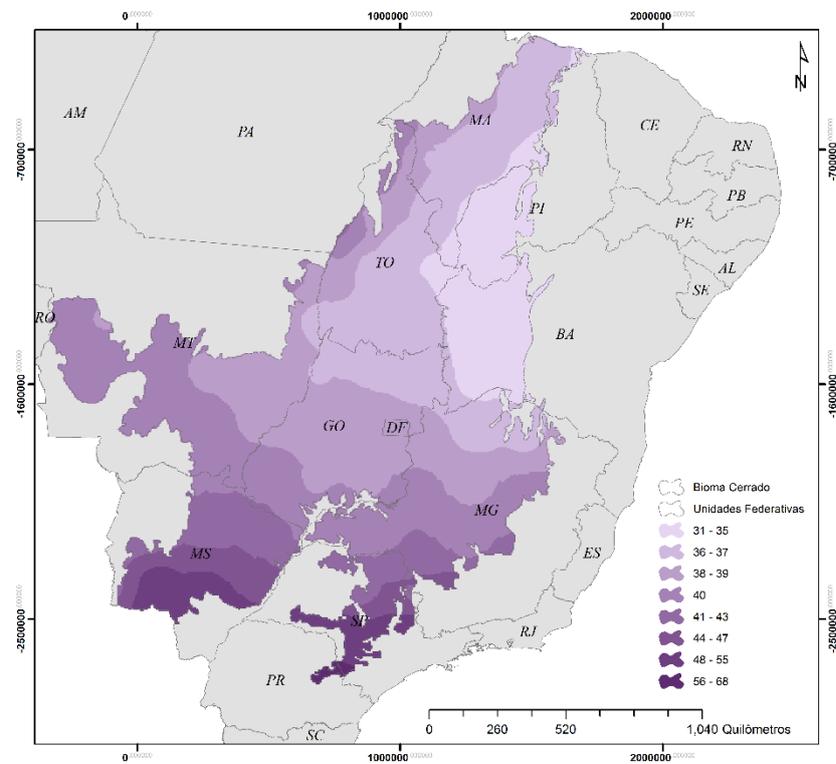


Figura 3.8 - Umidade do solo média (%) em células em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de INPE (2013).

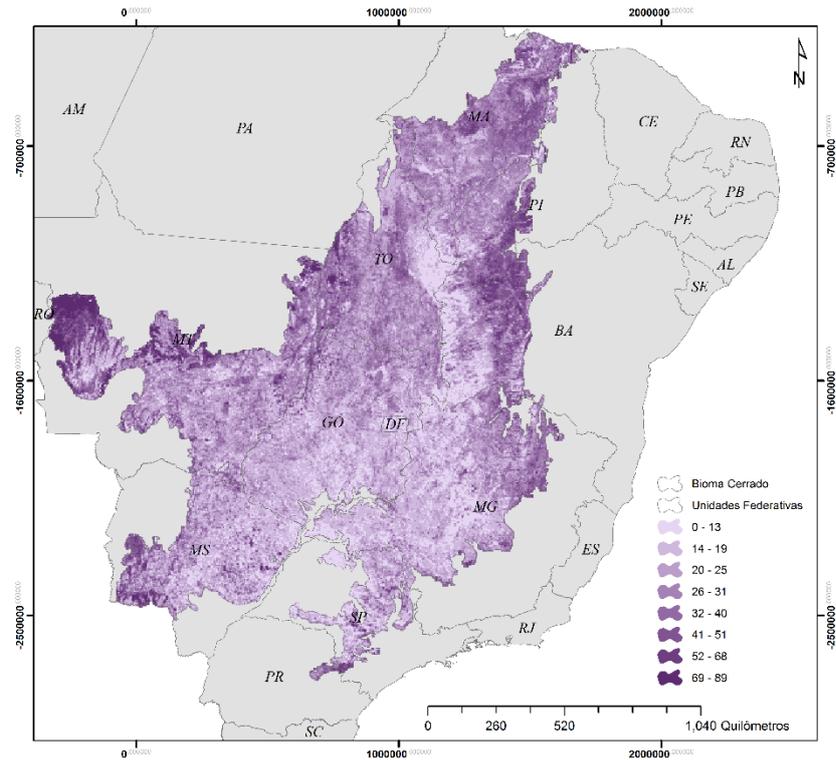


Figura 3.9 - Porcentagem de cobertura arbórea em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de Hansen *et al.* (2003).

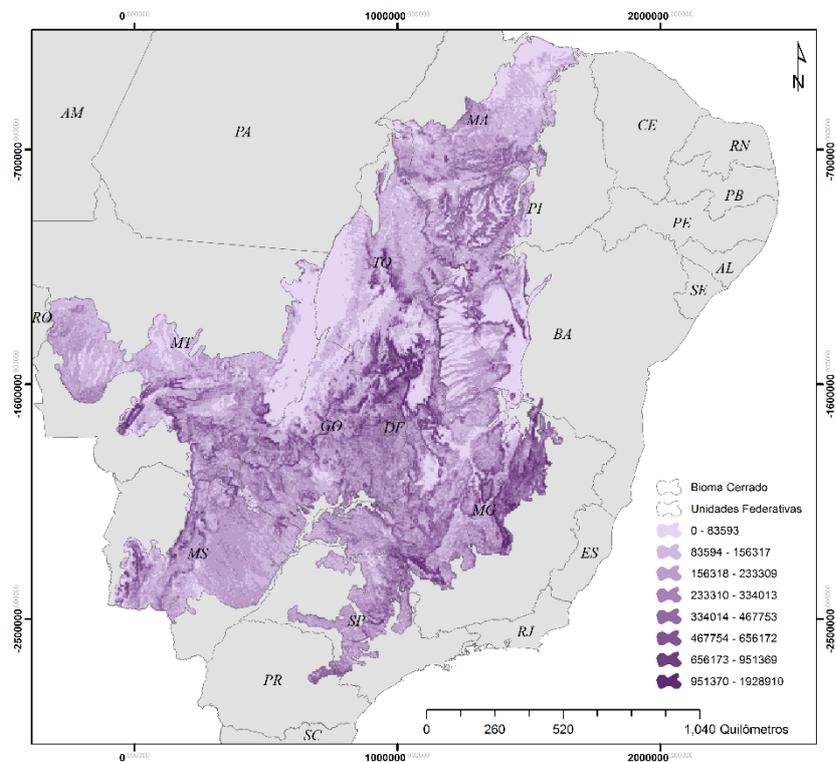


Figura 3.10 - Inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal (%) em células em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de TOPODATA (2008).

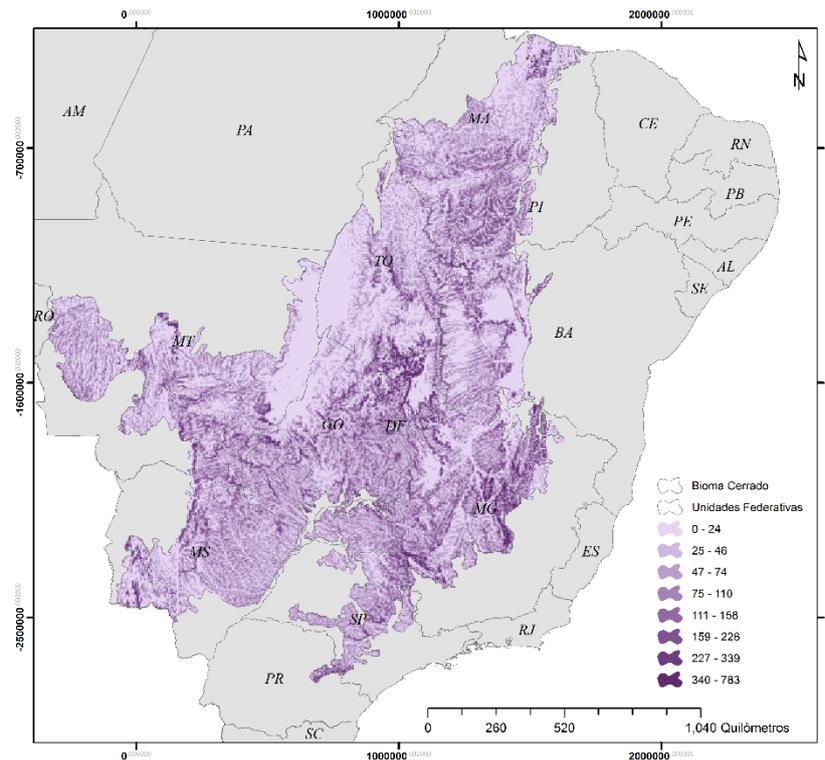


Figura 3.11 - Distância vertical em relação à drenagem mais próxima (metros) em células em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de Rennó *et al.* (2008).

### 3.2.3.2 Fatores de acessibilidade a mercados

As medidas de acessibilidade a mercados neste trabalho adotadas representam as conexões a mercados nacionais e incluem as variáveis: distância euclidiana a rodovias (*mkt\_dist\_roads*), distância a rodovias pavimentadas (*mkt\_dist\_paved\_roads*), distância a rodovias não pavimentadas (*mkt\_dist\_unpaved\_roads*), distância a centros urbanos (*mkt\_dist\_urban*), distância a rios (*mkt\_dist\_rivers*) e tempo de viagem às principais cidades (*mkt\_accessibility*). Estas variáveis, que representam a inserção do Cerrado no sistema produtivo nacional, são de essencial representação quando se deseja explicar os padrões de desflorestamento e a heterogeneidade intrarregional contidas em determinada região, como é o caso do presente Capítulo deste estudo. Especificamente, de acordo com Aguiar (2006), neste caso a variável que representa a distância a centros urbanos pode ser utilizada como uma “proxy” para acessibilidade a mercados locais e a serviços básicos. As Figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 ilustram, respectivamente, as variáveis *mkt\_dist\_roads*, *mkt\_dist\_paved\_roads*, *mkt\_dist\_unpaved\_roads*, *mkt\_dist\_urban*, *mkt\_dist\_rivers* e *mkt\_accessibility*.

As três primeiras variáveis (*mkt\_dist\_roads*, *mkt\_dist\_paved\_roads* e *mkt\_dist\_unpaved\_roads*) foram construídas a partir de dados disponibilizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) datados de 2012 (DNIT, 2013). As variáveis *mkt\_dist\_urban* e *mkt\_dist\_rivers* foram elaboradas com base nos dados disponíveis pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e correspondem aos anos de 2007 e 2009, respectivamente. Foi também construída a variável *mkt\_accessibility* que representa a acessibilidade como o tempo de viagem para determinado local de interesse, expresso em horas, utilizando estradas (pavimentadas ou não pavimentadas) e/ou água (rio navegável, lago e mar), referente ao ano de 2008 (NELSON, 2008).

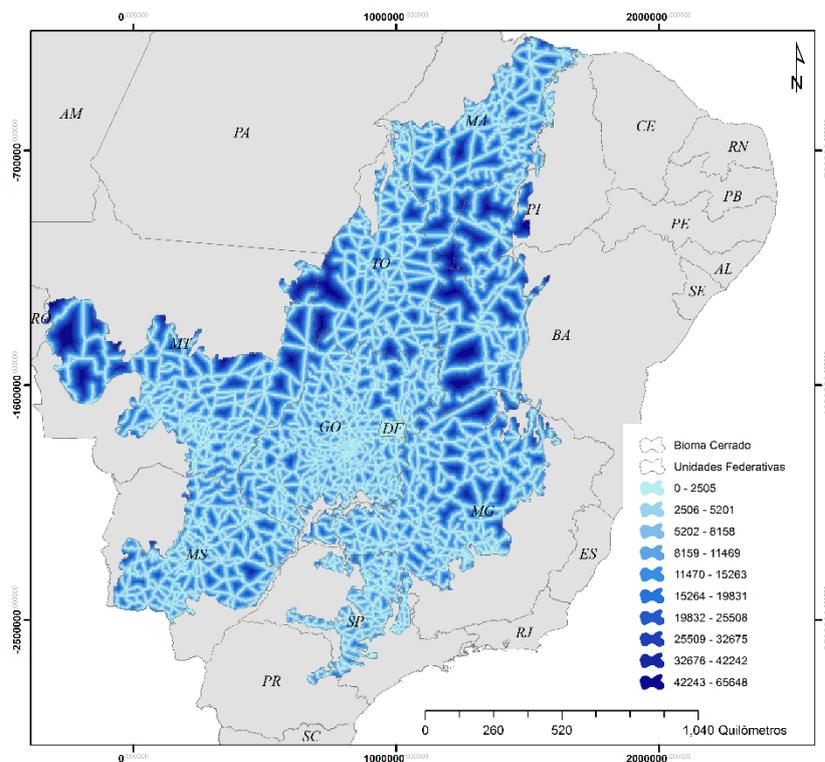


Figura 3.12 - Distância euclidiana a rodovias (pavimentadas e não pavimentadas) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de DNIT (2012).

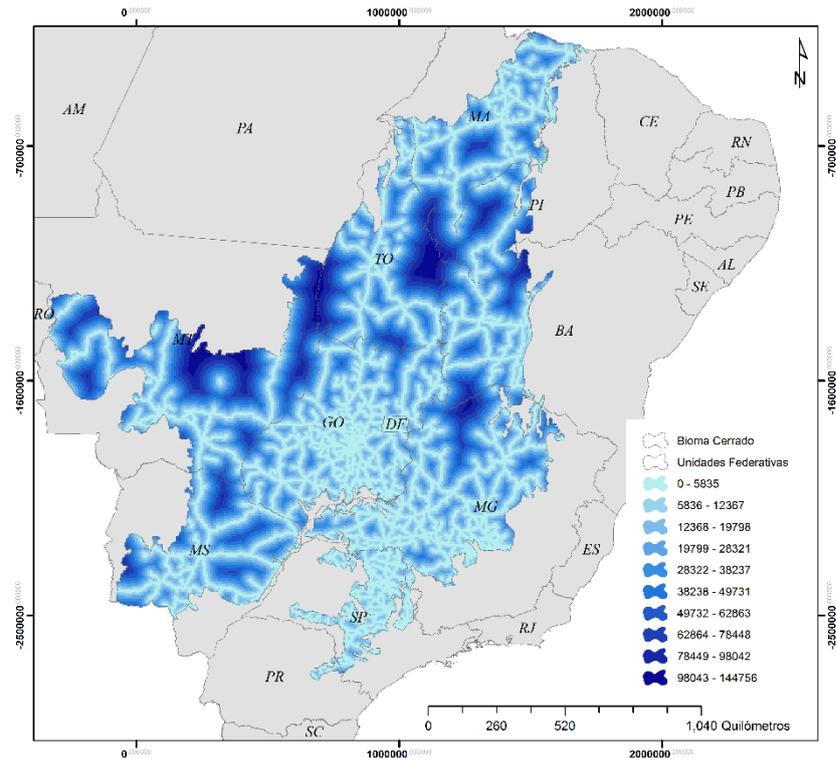


Figura 3.13. Distância euclidiana a rodovias pavimentadas em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de DNIT (2012).

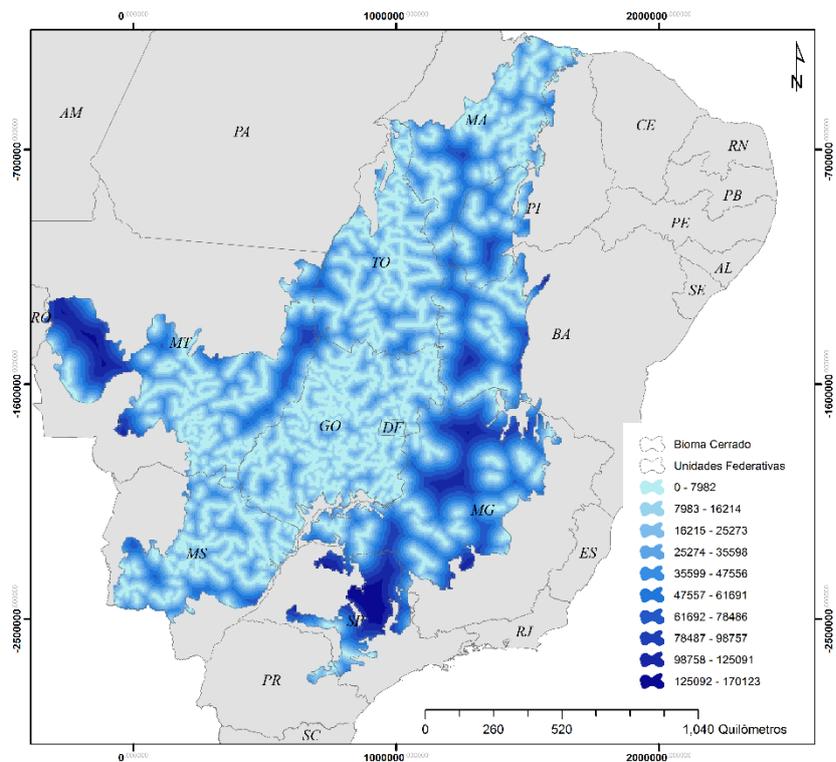


Figura 3.14. Distância euclidiana a rodovias não pavimentadas em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de DNIT (2012).

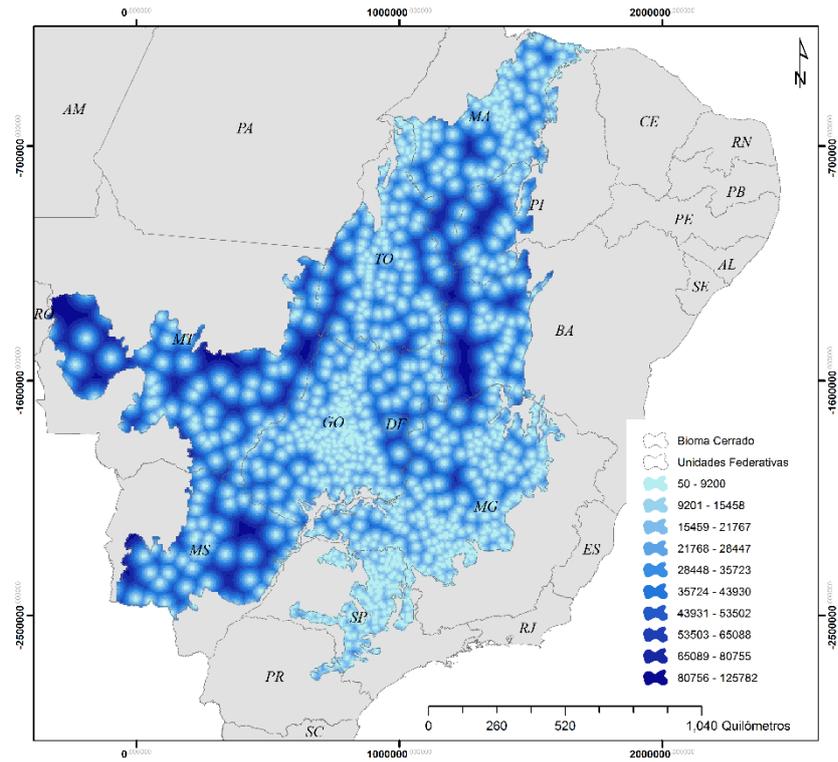


Figura 3.15 - Distância euclidiana a centros urbanos em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2007).

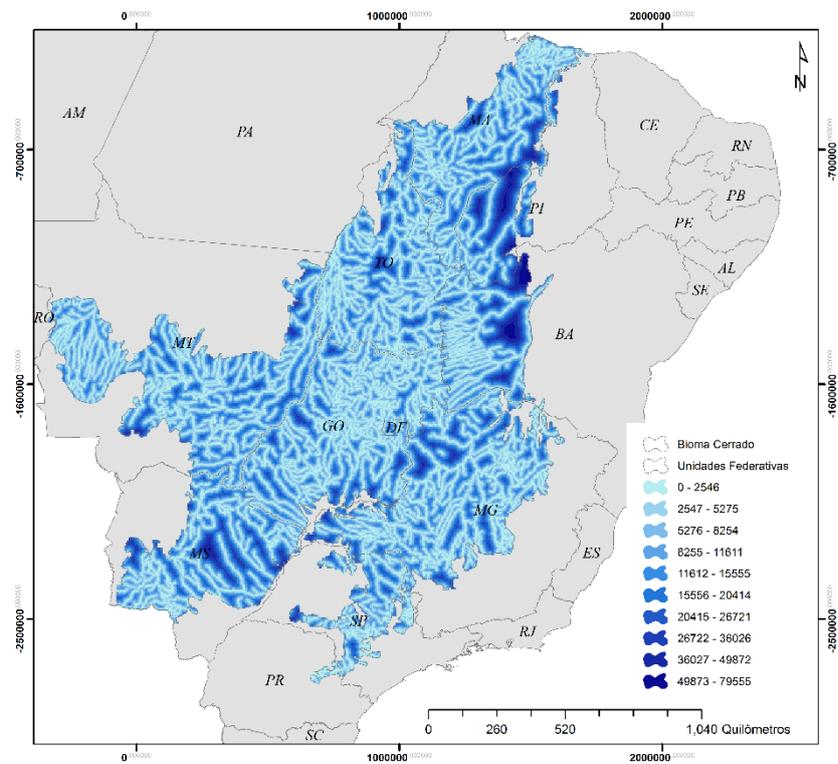


Figura 3.16 - Distância euclidiana aos rios principais em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2009).

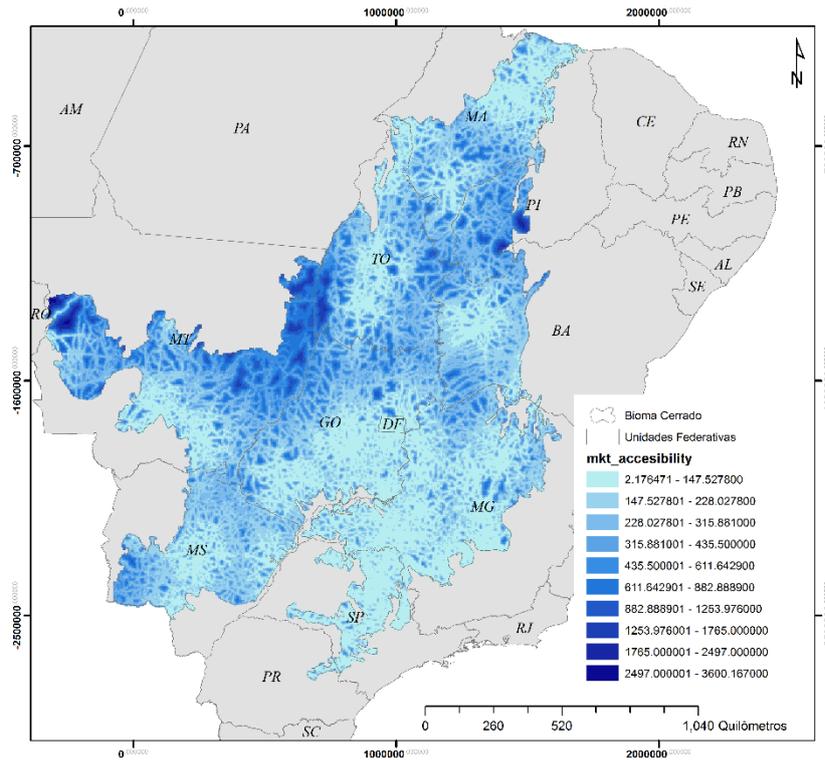


Figura 3.17 - Distância às principais cidades em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de NELSON (2008).

### 3.2.3.3 Fatores de atratividade econômica

Os fatores de atratividade econômica são representados pelas nove variáveis: distância a depósitos minerais (*attrac\_dist\_mineral*), quantidade de madeira em tora produzida (*attrac\_wood*), quantidade de lenha produzida (*attrac\_firewood*), quantidade de carvão vegetal produzida (*attrac\_charcoal*), quantidades produzidas de soja em grão (*attrac\_soy*), cana-de-açúcar (*attrac\_sugar\_cane*), milho em grão (*attrac\_corn*) e algodão herbáceo (*attrac\_cotton*) e, por fim, o efetivo de rebanho bovino (*attrac\_cattle\_raising*). A variável *attrac\_dist\_mineral* é expressa em metros (m), *attrac\_wood* em metros cúbicos (m<sup>3</sup>), *attrac\_cattle\_raising* em cabeças e as demais em toneladas (ton).

A distância a depósitos minerais é representada como a distância euclidiana de cada célula até o depósito mineral mais próximo (Figura 3.18), de acordo com os dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) de 2009. Já as Figuras. 3.19, 3.20 e 3.21 representam, respectivamente, a quantidade de madeira em tora, lenha e carvão vegetal produzida pelos municípios que compõem o Cerrado brasileiro. As quantidades

produzidas de soja, cana-de-açúcar, milho em grão, algodão herbáceo e efetivo da pecuária são apresentadas nas Figuras 3.22, 3.23, 3.24, 3.25 e 3.26, respectivamente.

De acordo com Figura 3.18, a maior concentração de depósitos minerais está em todo o estado de Goiás, na porção centro-oeste do estado de Minas Gerais além de toda área do bioma que se encontra inserida no estado de São Paulo.

Por sua vez, a Figura 3.19 mostra que as maiores quantidades de madeira em tora ( $m^3$ ) produzidas dentro dos limites do bioma são oriundas de municípios na porção centro-oeste de Mato Grosso, ao longo do limite do Cerrado com a Amazônia (Arco do Desmatamento) e na região sudoeste da Bahia. As duas regiões são reconhecidas frentes de expansão agropecuárias no Cerrado (AGUIAR, 2006; ROCHA *et al.*, 2011). A produção de lenha no bioma encontra-se concentrada principalmente na região oeste da Bahia e regiões sul e norte do estado do Maranhão, conforme ilustrado pela Figura 3.20.

A Figura 3.21 mostra que os municípios que concentram as maiores quantidades de produção de carvão vegetal estão localizados na região central e oeste do Mato Grosso do Sul, noroeste de Minas Gerais, subindo pelo oeste da Bahia, sul e oeste do Piauí e região central do Maranhão (região de MATOPIBA).

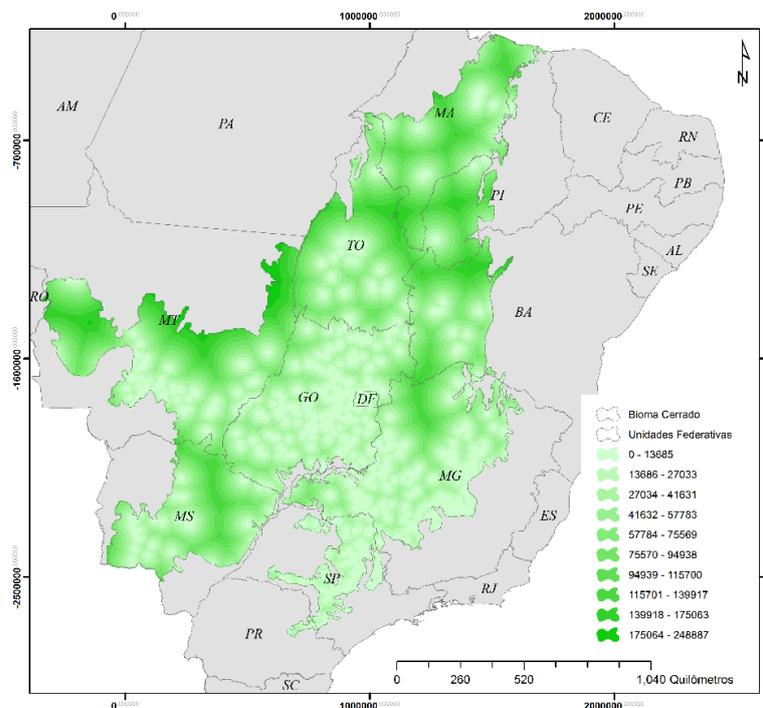


Figura 3.18 - Distância euclidiana a depósitos minerais em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de DNPM (2009).

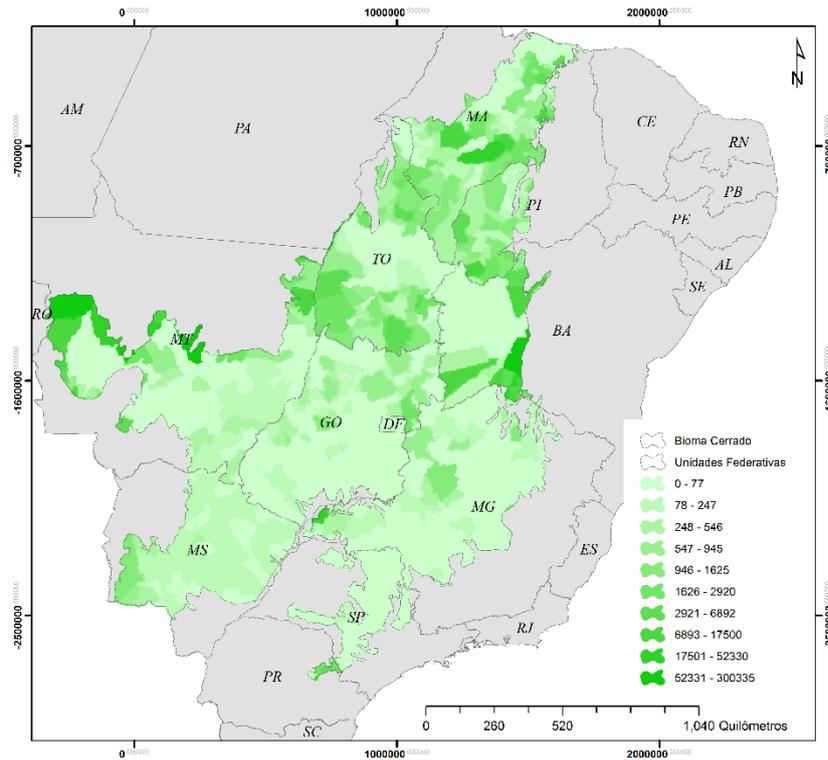


Figura 3.19 - Quantidade produzida de madeira em tora ( $m^3$ ) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

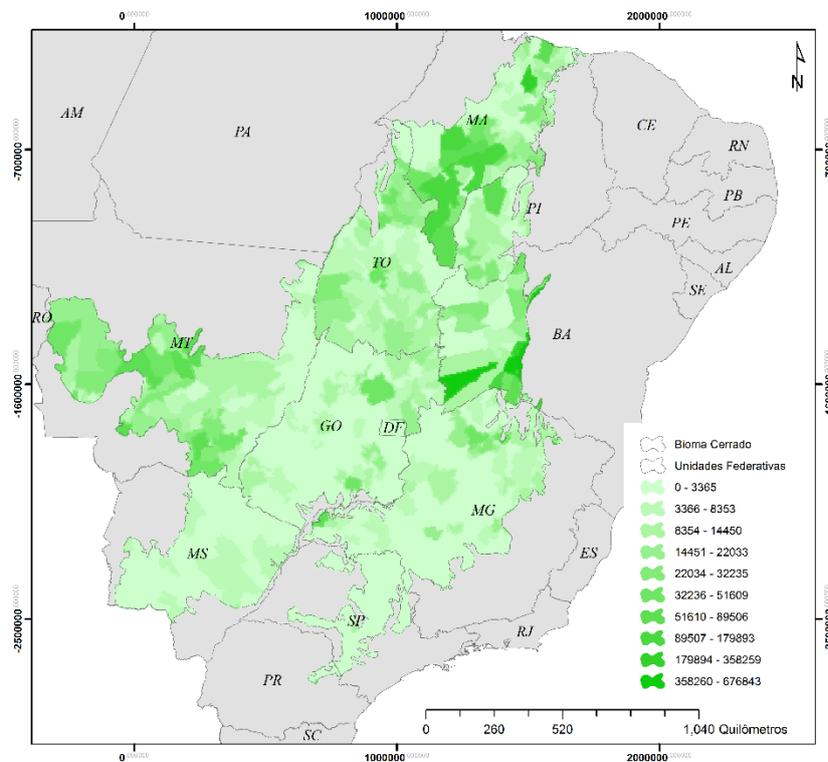


Figura 3.20 - Quantidade produzida de lenha (toneladas) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

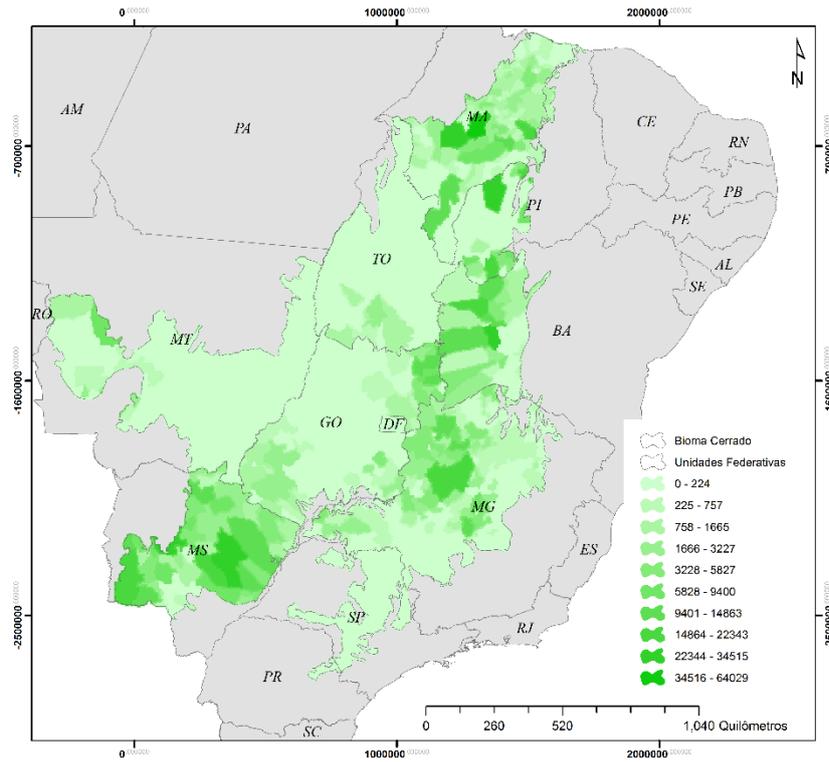


Figura 3.21 - Quantidade produzida de carvão vegetal (toneladas) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

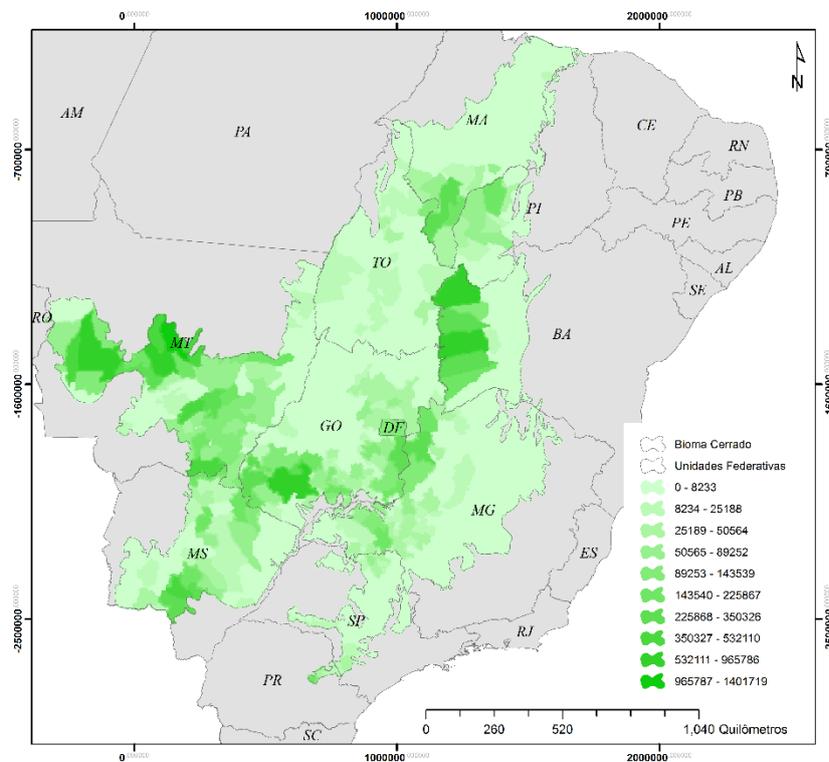


Figura 3.22 - Quantidade produzida de soja (toneladas) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

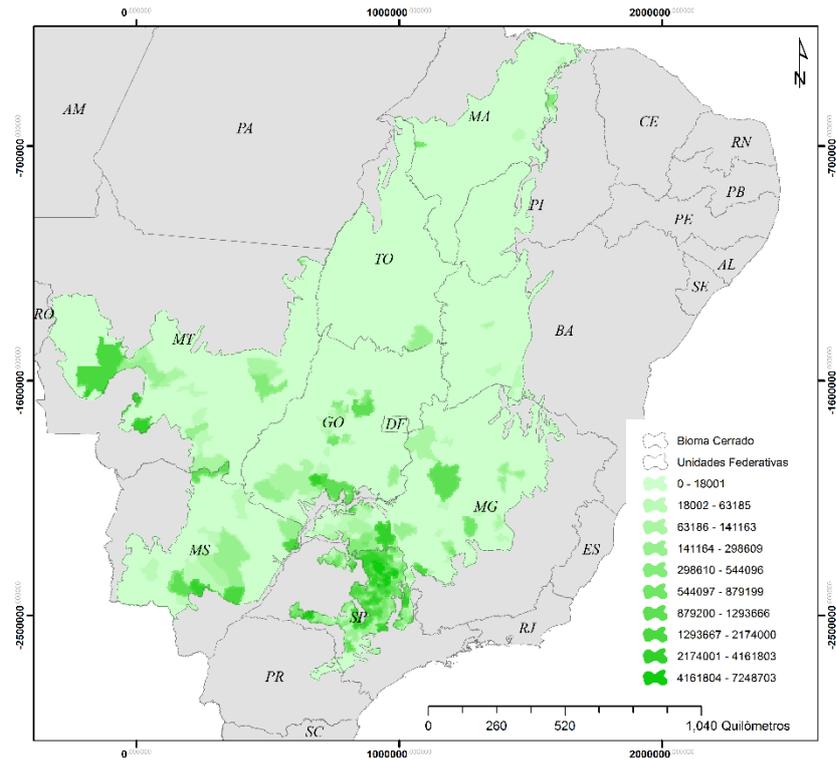


Figura 3.23 - Quantidade produzida de cana-de-açúcar (toneladas) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

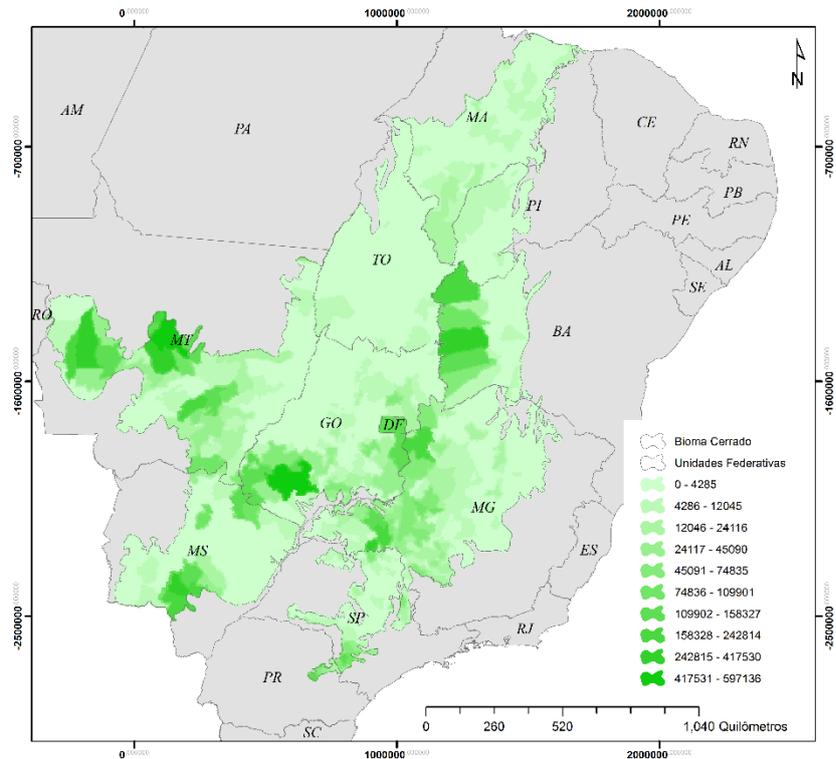


Figura 3.24 - Quantidade produzida de milho em grãos (toneladas) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

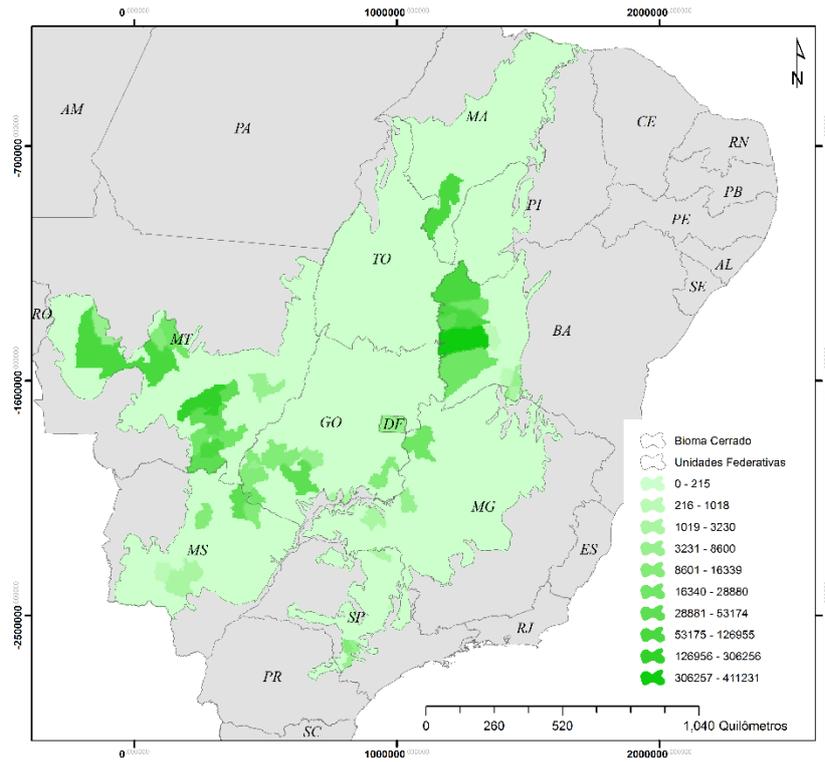


Figura 3.25 - Quantidade produzida de algodão (toneladas) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

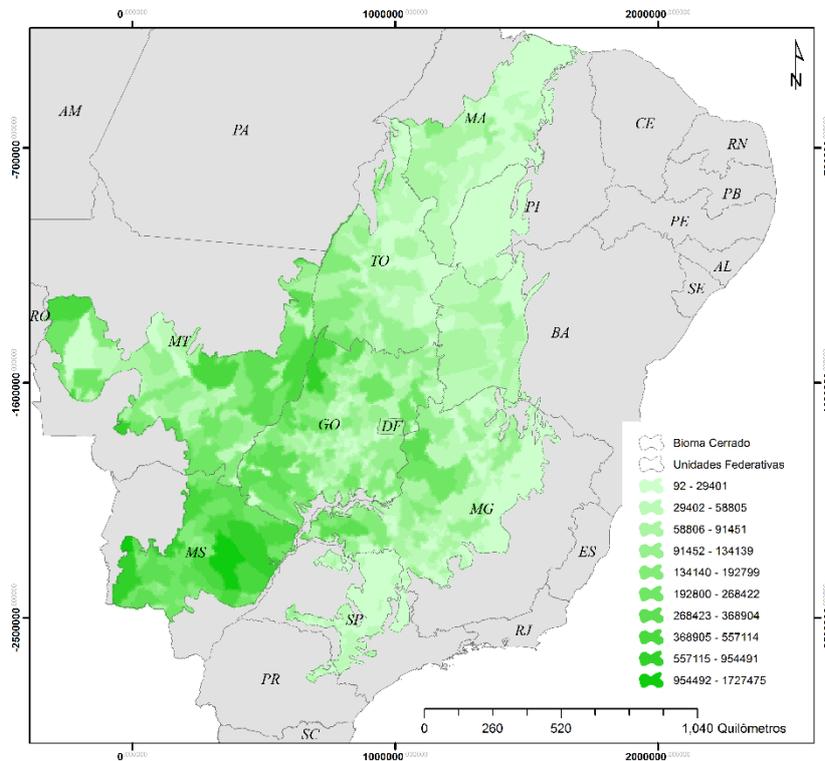


Figura 3.26 - Efetivo da pecuária (cabeças de bovinos) em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

#### 3.2.3.4 Fatores demográficos

As variáveis construídas para representar os fatores demográficos atuantes no Cerrado foram: a densidade demográfica (*demo\_dens*), a proporção da população urbana (*demo\_urban*), a proporção da população rural (*demo\_rural*) e a porcentagem de migrantes recentes (*demo\_migr*). Todas as variáveis são oriundas do Censo Demográfico realizado em 2010 pelo IBGE (IBGE, 2011) e foram computadas na célula considerando a média de valores correspondentes em cada município, ponderado pela intersecção da área entre os municípios e a célula. A necessidade de inserção destas variáveis no banco de dados se dá à medida que a população, seja urbana ou rural, tem importante papel no desmatamento atuando como mercado consumidor de produtos agropecuários e fornecedor de mão-de-obra.

A Figura 3.27 mostra a densidade populacional nos municípios compreendidos pelo Cerrado. Em geral, a densidade populacional dos municípios que compõem o Cerrado é baixa, com exceção das capitais e regiões metropolitanas onde se observa um aumento da densidade. A média de densidade populacional observada nas células regulares deste estudo foi de 16 habitantes por quilômetro quadrado. As Figuras 3.28 e 3.29 são complementares e mostram que a população urbana encontra-se em maior concentração na região sul e centro-oeste do bioma enquanto a população rural concentra-se na porção norte e nordeste do bioma. A região sul e centro-oeste do Cerrado abriga uma fronteira de expansão agropecuária mais consolidada em relação à frente localizada na região norte e nordeste do mesmo conhecida como MATOPIBA e atualmente ativa. De acordo com a Figura 3.30, o maior percentual de migrantes no ano de 2010 ocupa a porção centro-oeste e o oeste do bioma, onde as maiores percentuais estão localizadas no estado do Mato Grosso.

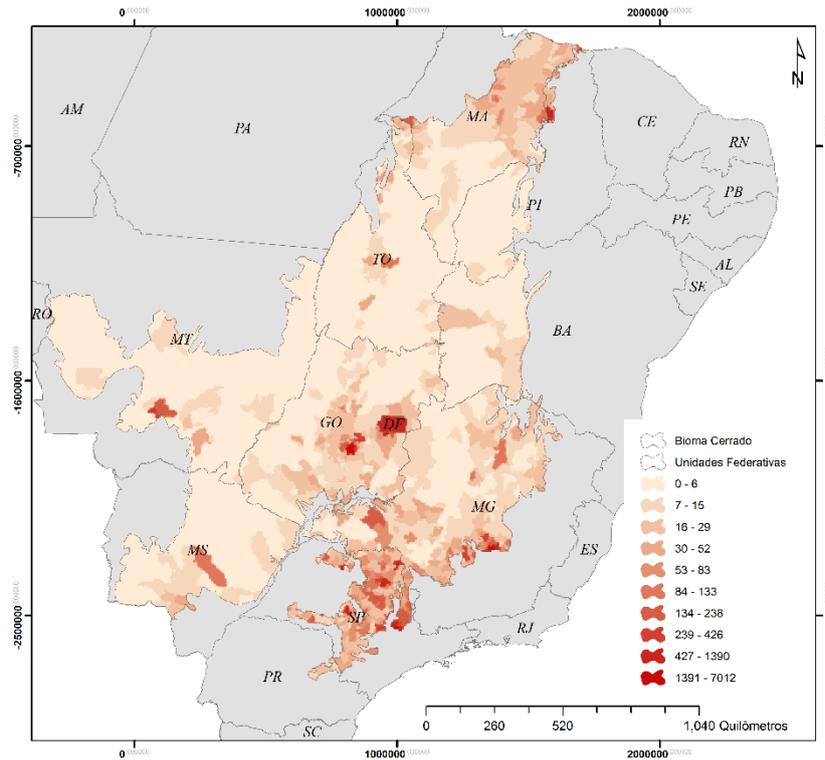


Figura 3.27 - (a) Densidade demográfica (habitantes.km<sup>2</sup>) e (b) densidade populacional acima de 50 habitantes.km<sup>2</sup> em 2010 em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

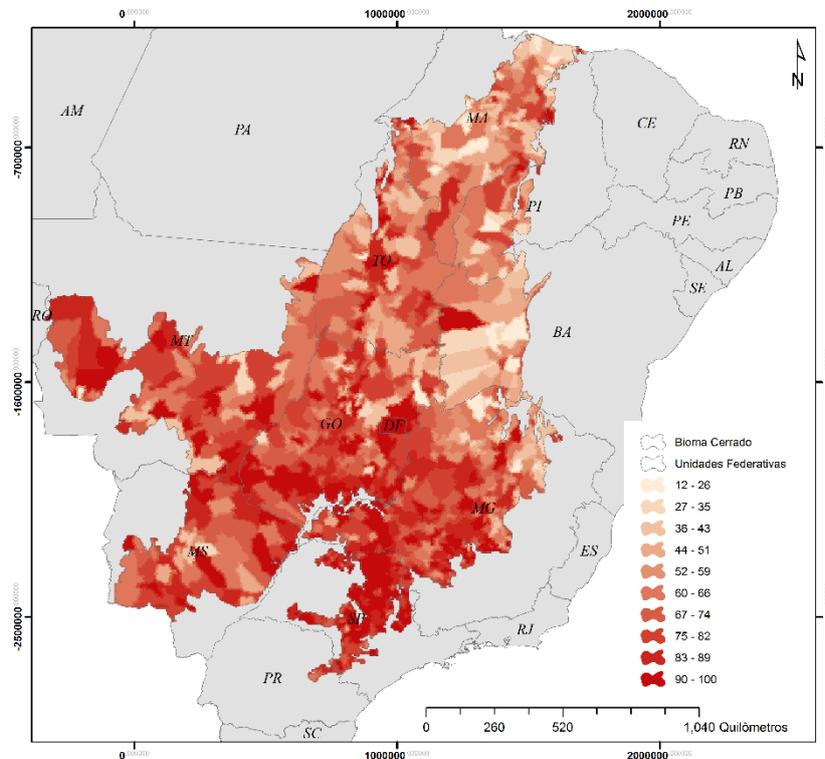


Figura 3.28 - Proporção da população urbana (%) em 2010 em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

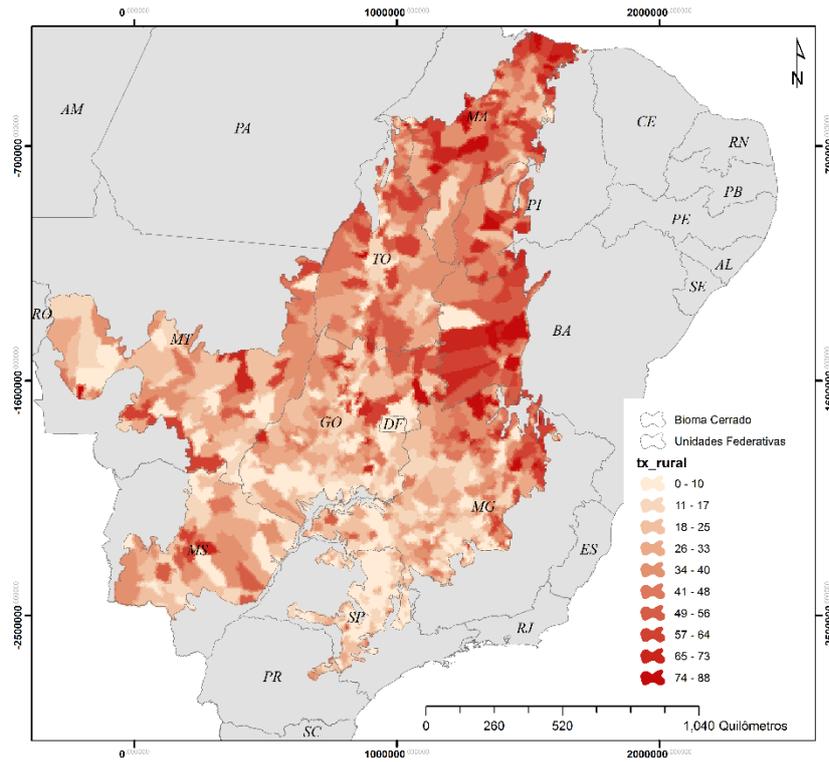


Figura 3.29 - Proporção da população rural (%) em 2010 em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

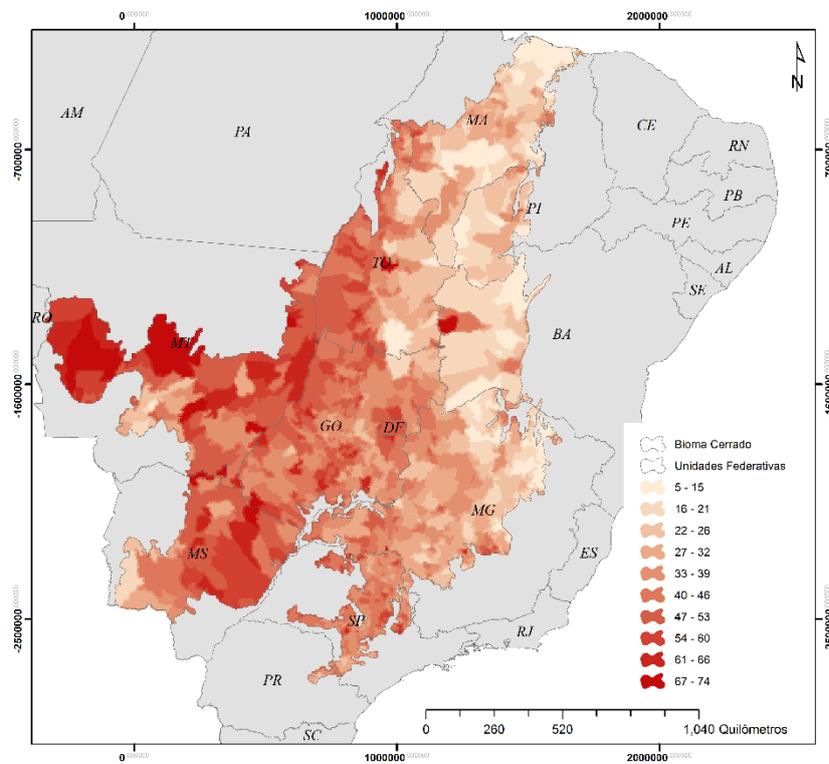


Figura 3.30 - Percentual de migrantes em 2010 em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2010).

### 3.2.3.5 Fatores tecnológicos

Esta categoria é representada por duas variáveis: número médio de tratores por propriedade (*tech\_tractor*) e porcentagem de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao total de propriedades do município (*tech\_assistance*). Temos então que, as duas variáveis foram derivadas de dados no nível municipal e representadas nas células de acordo com a média de valores correspondentes em cada município ponderados pela área de intersecção entre os municípios e a célula. As variáveis visam representar as condições de acesso à mecanização e à assistência técnica nas propriedades. Os dados utilizados para a construção das variáveis foram providos pelo Censo Agropecuário realizado pelo IBGE em 2006 (IBGE, 2006). Desta forma, a Figura 3.31 mostra o número médio de tratores por município em 2006 e a Figura 3.32 o número médio de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao número total de propriedades do município em 2006.

Avaliando as Figuras 3.31 e 3.32, observa-se que os municípios que possuem maior número de tratores estão localizados principalmente na porção sudoeste do bioma, nos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais e São Paulo. Em menor concentração encontram-se os municípios localizados na Bahia, Piauí, Maranhão e Tocantins. Em relação ao acesso à assistência técnica, a região norte e nordeste do bioma - região em forte expansão agropecuária -, compreendem os municípios com menor número médio de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao número total de propriedades. A maior concentração de altos valores desta variável está localizada em municípios do estado de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Mato Grosso (Arco do Desmatamento). Em conjunto, esses dados indicam que condições favoráveis de acesso à mecanização e à assistência técnica estão presentes principalmente na área de ocupação mais consolidada do bioma, a região sudoeste do Cerrado. Em menor concentração, as mesmas condições podem ser observadas em municípios que compõem a frente de expansão MATOPIBA.

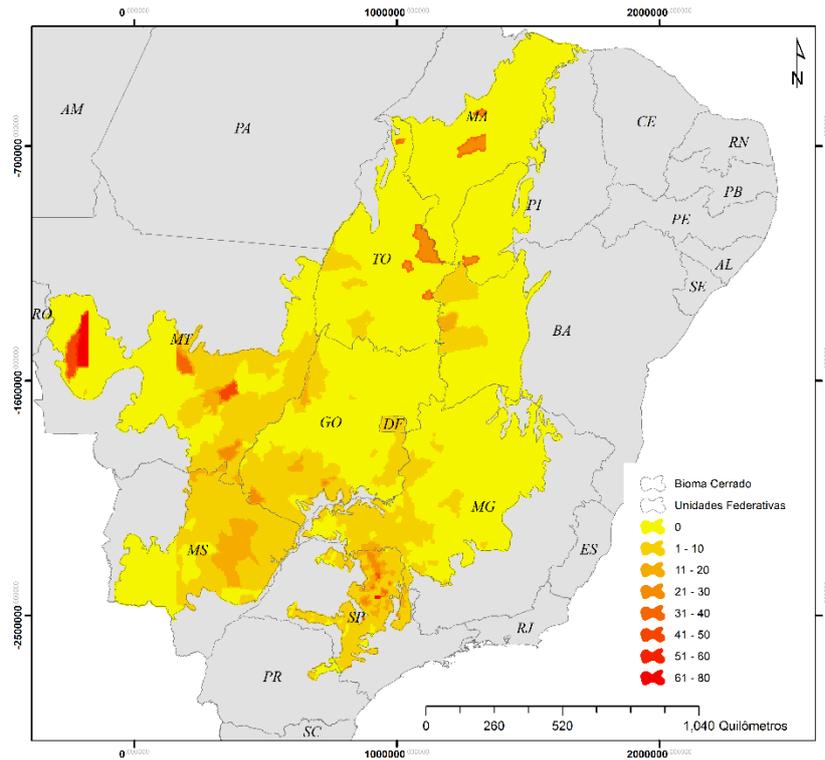


Figura 3.31 - Número médio de tratores por município (%) em 2006 em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

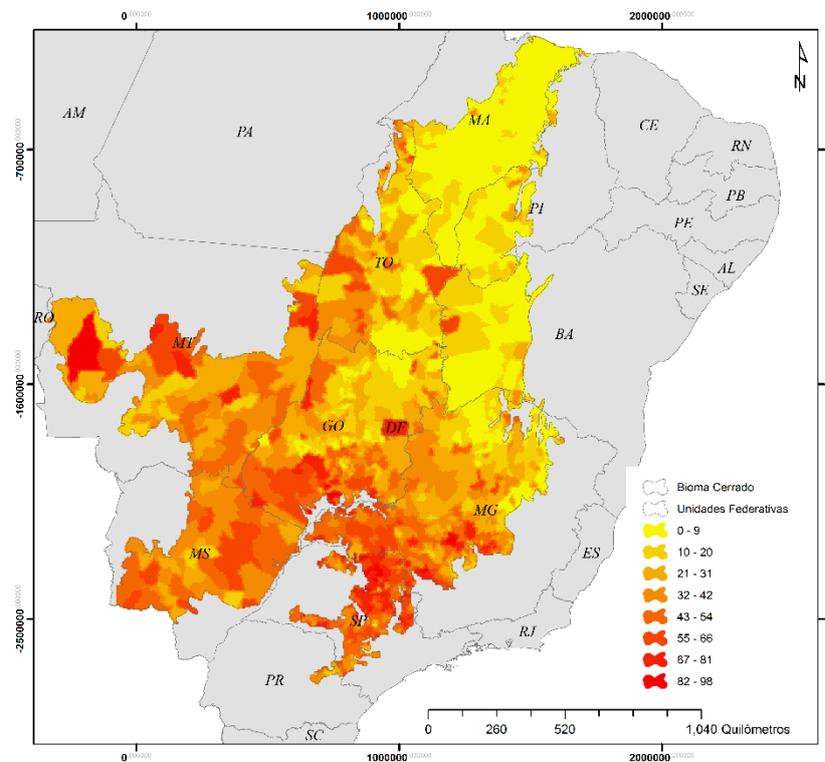


Figura 3.32 - Número médio de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao número total de propriedades do município (%) em 2006 em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

### 3.2.3.6 Fatores de estrutura agrária

Ainda de acordo com os dados do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006), as variáveis indicadoras da estrutura agrária do Cerrado foram: a porcentagem de pequenas, médias e grandes propriedades rurais em relação ao número total de propriedades do município (*agr\_nr\_small*, *agr\_nr\_medium* e *agr\_nr\_large*, respectivamente), a porcentagem de pequenas, médias e grandes propriedades rurais em relação à área total de propriedades do município (*agr\_small*, *agr\_medium* e *agr\_large*, respectivamente), a porcentagem de propriedades rurais com agricultura familiar em relação ao número total de propriedades do município (*agr\_nr\_familiar*), porcentagem de propriedades rurais com agricultura não familiar em relação ao número total de propriedades do município (*agr\_nr\_unfamiliar*), porcentagem da área de propriedades com agricultura familiar em relação à área total de propriedades do município (*agr\_familiar*) e a porcentagem da área de propriedades com agricultura não familiar em relação à área total de propriedades do município (*agr\_unfamiliar*).

Estes indicadores foram construídos a partir de informações no nível municipal e a soma de *agr\_nr\_small*, *agr\_nr\_medium* e *agr\_nr\_large*, assim como a de *agr\_small*, *agr\_medium* e *agr\_large*, é de 100%. As variáveis consideram apenas as áreas que são propriedades rurais dentro do município, não representando portanto, áreas protegidas e demais terras públicas. Segundo Aguiar (2006), estas variáveis são indicadoras do domínio de determinado tipo de ator social (pequeno, médio ou grande produtor rural) presente nas diferentes sub-regiões. Assim, regiões com alta concentração de pequenas propriedades em relação ao número total de propriedades e domínio de propriedades com pequena área indicam a presença de pequenos produtores. Por sua vez, regiões com alta concentração de grandes propriedades em relação ao número total de propriedades e de propriedades com grandes áreas em relação à área total das propriedades do município indicam a presença de grandes produtores.

A análise da Figura 3.33 permite observar claramente que ao longo de toda a extensão do Cerrado brasileiro ocorre o domínio de pequenas propriedades rurais em relação ao número total de propriedades, especialmente na porção leste do bioma que abriga a frente de expansão agropecuária MATOPIBA. Já a maior concentração de grandes propriedades rurais ocorre nos estados do Mato Grosso do Sul, Goiás, Mato Grosso e, em menor escala no oeste da Bahia (Figura 3.35). Finalmente, é possível verificar que maior concentração

de médias propriedades ocorre na porção central do bioma, de acordo com a Figura 3.34. Com relação à porcentagem de pequenas, médias e grandes propriedades rurais em relação à área total de propriedades dos municípios compreendidos pelo Cerrado, ocorre o domínio de propriedades com grandes áreas (Figura 3.38). Analisando a distribuição das duas variáveis ao longo da sub-região de MATOPIBA, temos que as pequenas propriedades rurais representam uma proporção significativa em número de propriedades em quase toda sua extensão. Entretanto, quando analisadas em função da área dos municípios, as grandes propriedades rurais são predominantes na região.

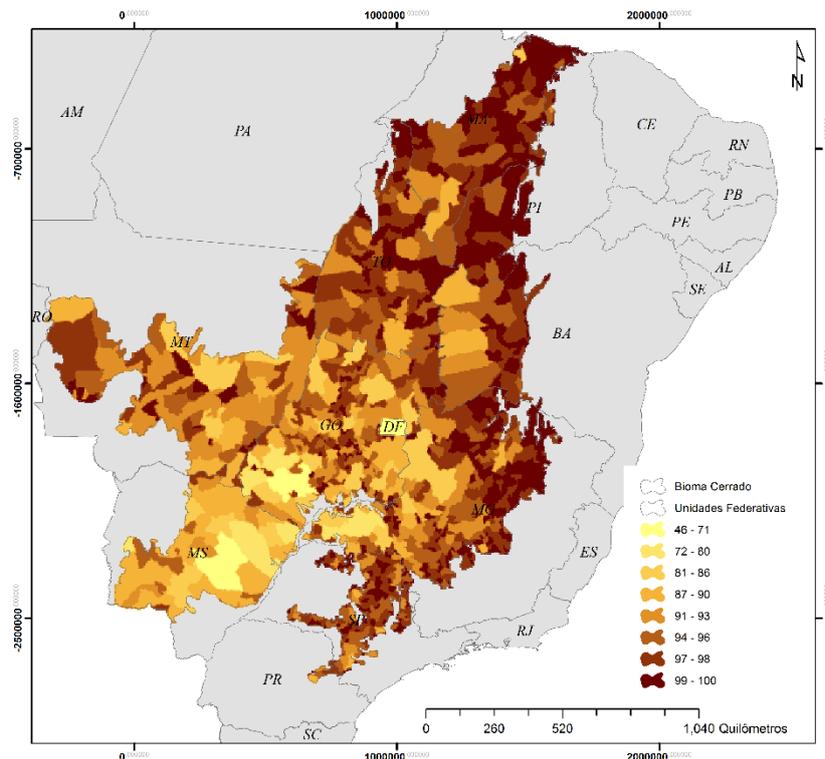


Figura 3.33 - Porcentagem de pequenas propriedades rurais em relação ao número total de propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

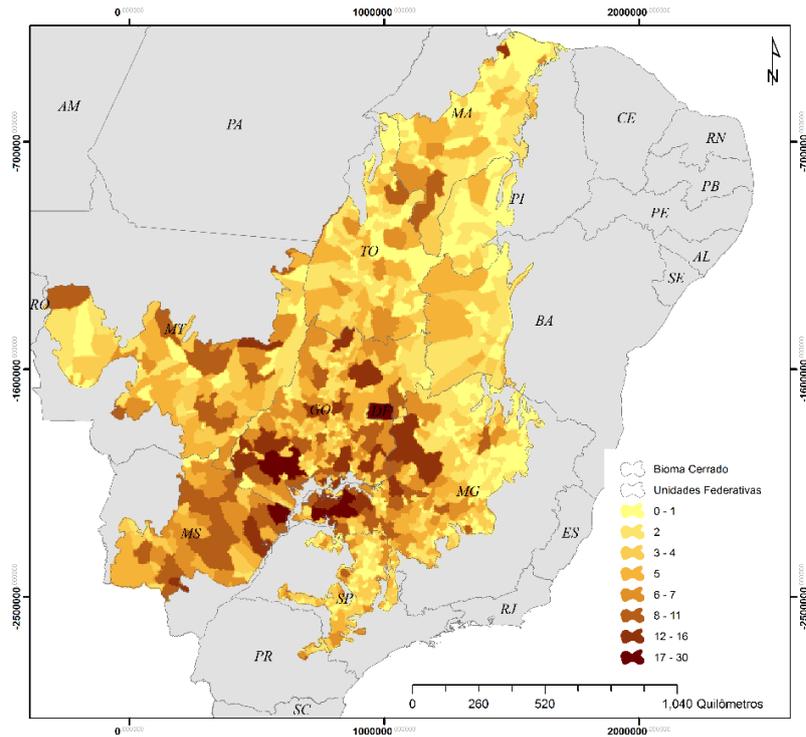


Figura 3.34 - Porcentagem de médias propriedades rurais em relação ao número total de propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

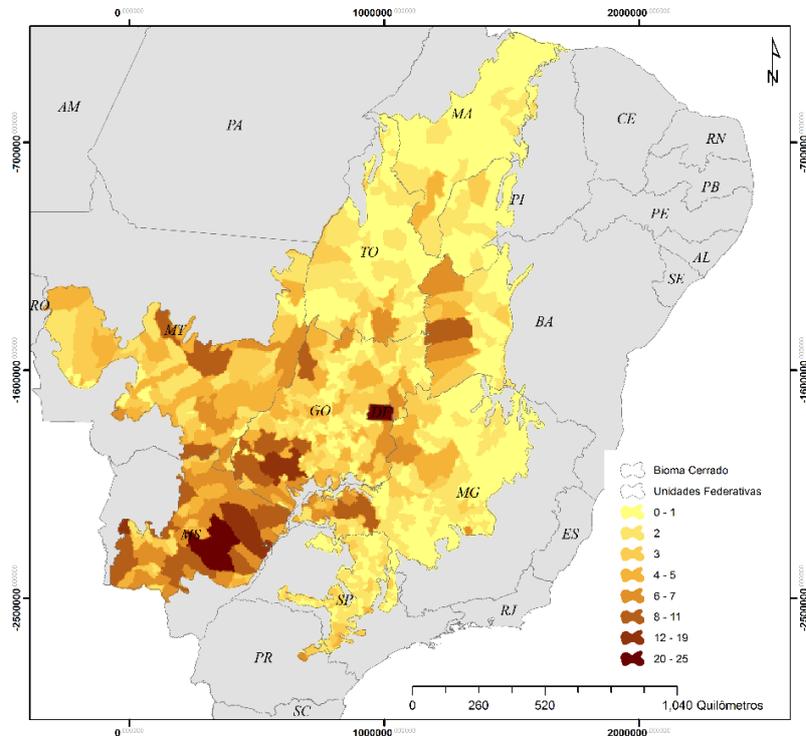


Figura 3.35 - Porcentagem de grandes propriedades rurais em relação ao número total de propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

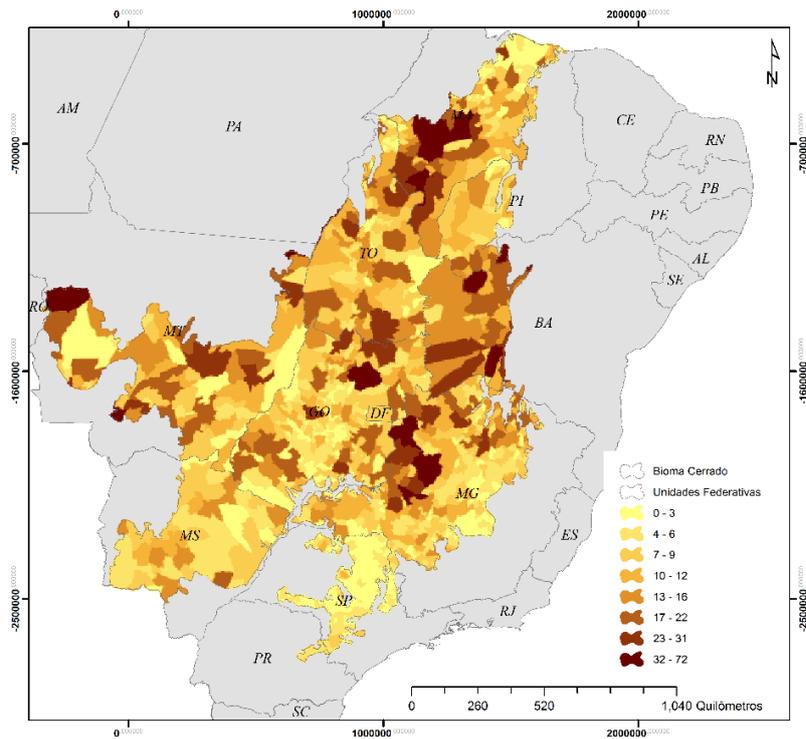


Figura 3.36 - Porcentagem de propriedades rurais pequenas em relação à área total das propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

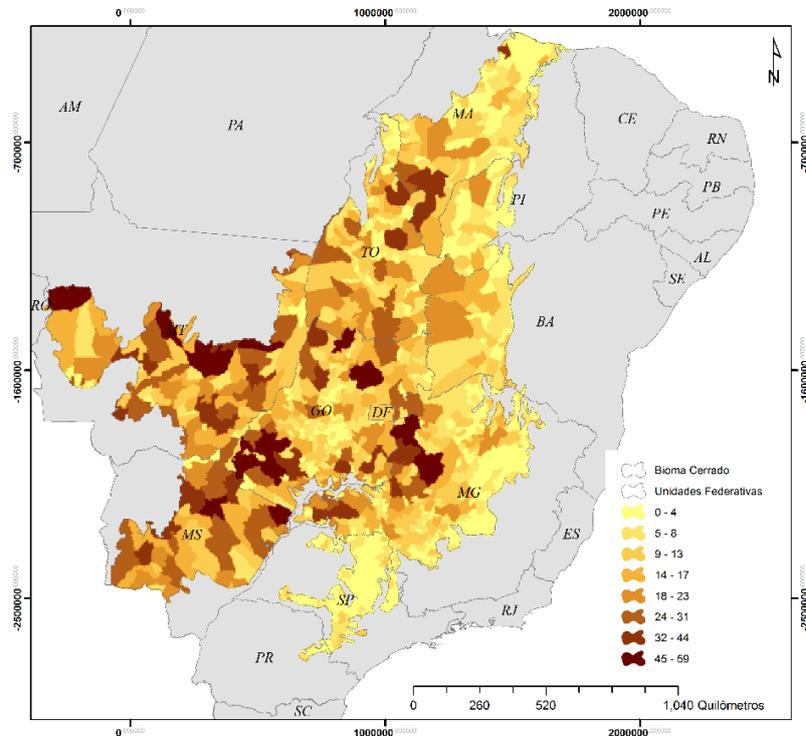


Figura 3.37 - Porcentagem de propriedades rurais médias em relação à área total das propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

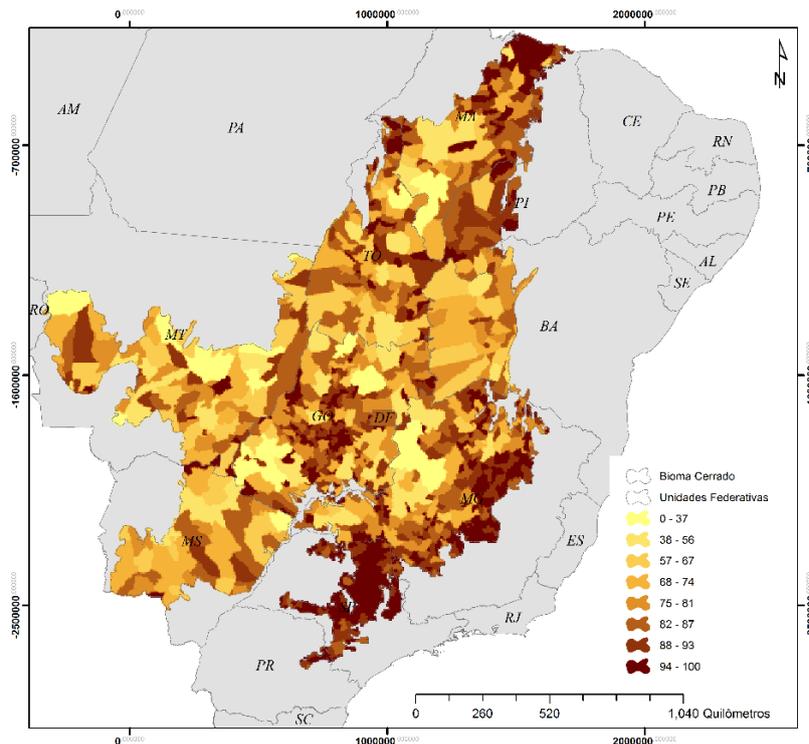


Figura 3.38 - Porcentagem de propriedades rurais grandes em relação à área total das propriedades rurais do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

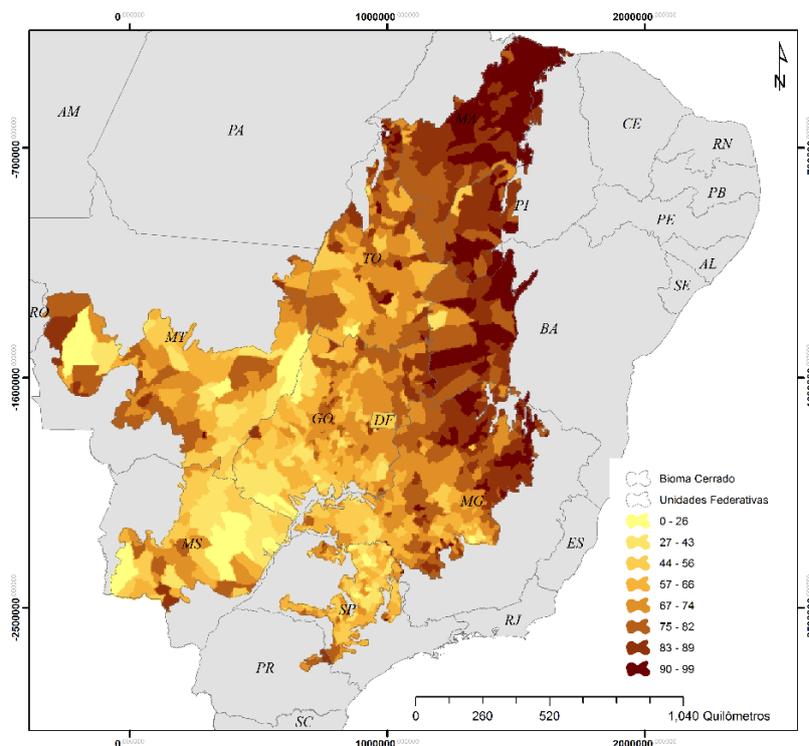


Figura 3.39 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

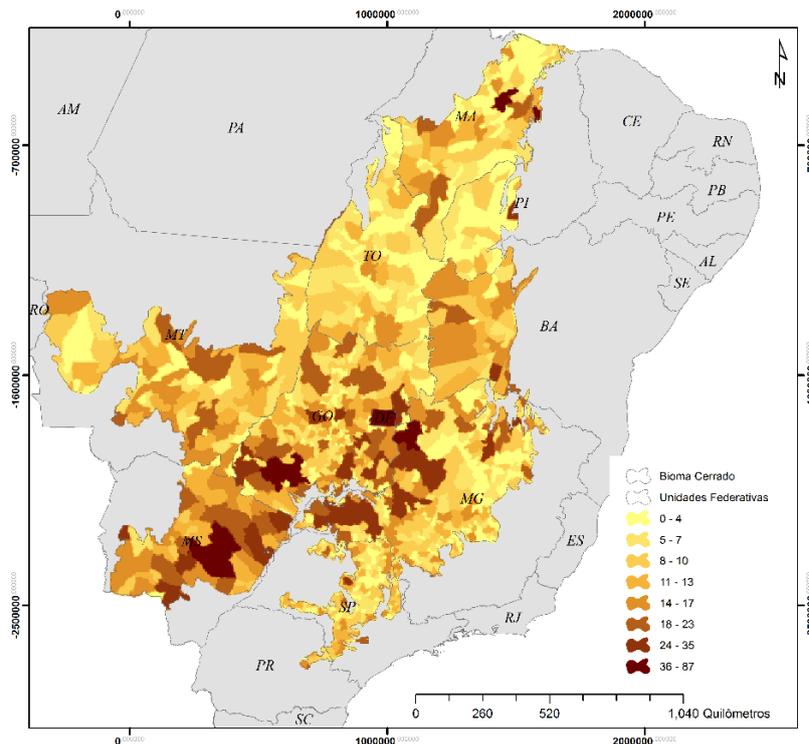


Figura 3.40 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura não familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

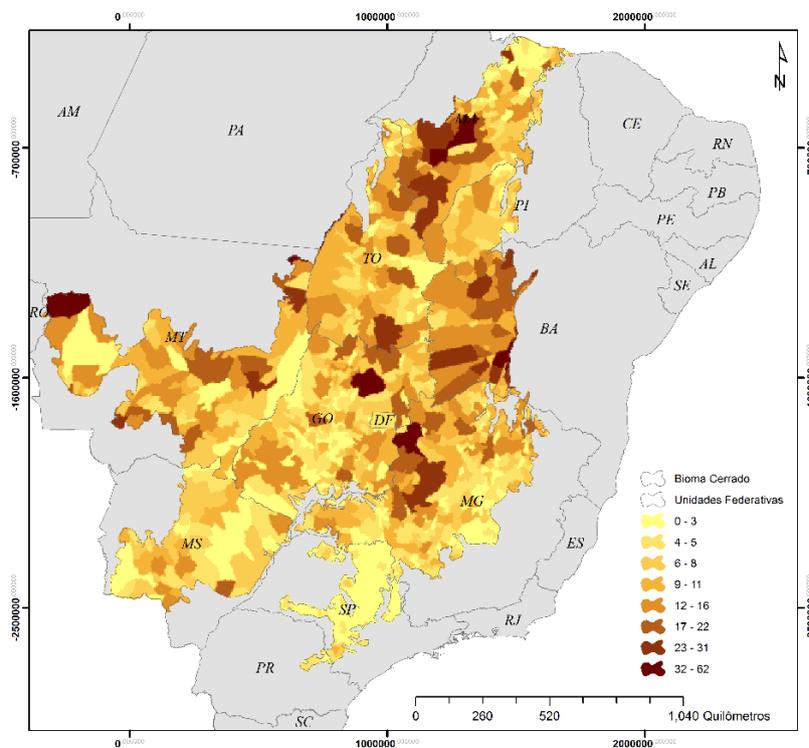


Figura 3.41 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

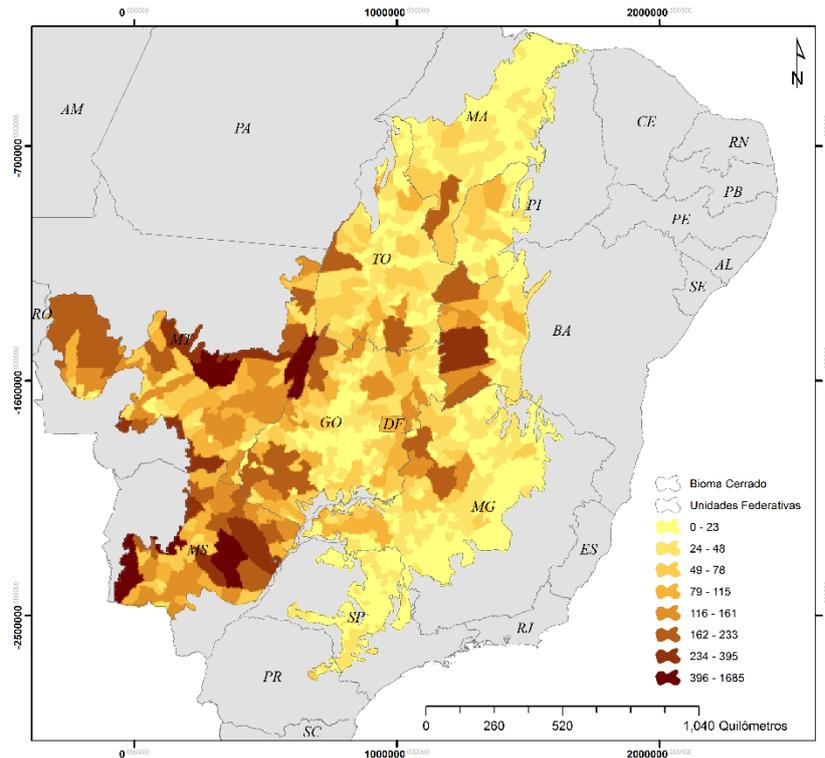


Figura 3.42 - Porcentagem de propriedades rurais com agricultura não familiar em relação ao número total de propriedades do município em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptada de IBGE (2006).

### 3.2.3.7 Fatores sociais e econômicos

Os fatores sociais e econômicos foram representados pelas seguintes variáveis: porcentagem de pessoas com dez anos ou mais alfabetizadas (*soc\_literacy*), porcentagem da população com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, considerando a porcentagem que recebe apenas benefícios do governo (*soc\_renda\_1*) e desconsiderando a porcentagem que recebe apenas benefícios governamentais (*soc\_renda\_2*). Estas variáveis também foram construídas a partir de informações no nível municipal resultantes do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011) e foram representadas nas células de acordo com a média de valores correspondentes em cada município ponderados pela área de intersecção entre os municípios e a célula.

Observa-se na Figura 3.43 que as porções sul (São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul) e oeste (Mato Grosso) do bioma apresentam as maiores concentrações de população com dez anos ou mais alfabetizada. Por outro lado, a sub-região MATOPIBA apresenta municípios com menores percentuais de alfabetização em relação ao restante do bioma.

Considerando as Figuras 3.44 e 3.45 é possível verificar que as frações norte e leste do bioma abrigam a população com menor renda do bioma.

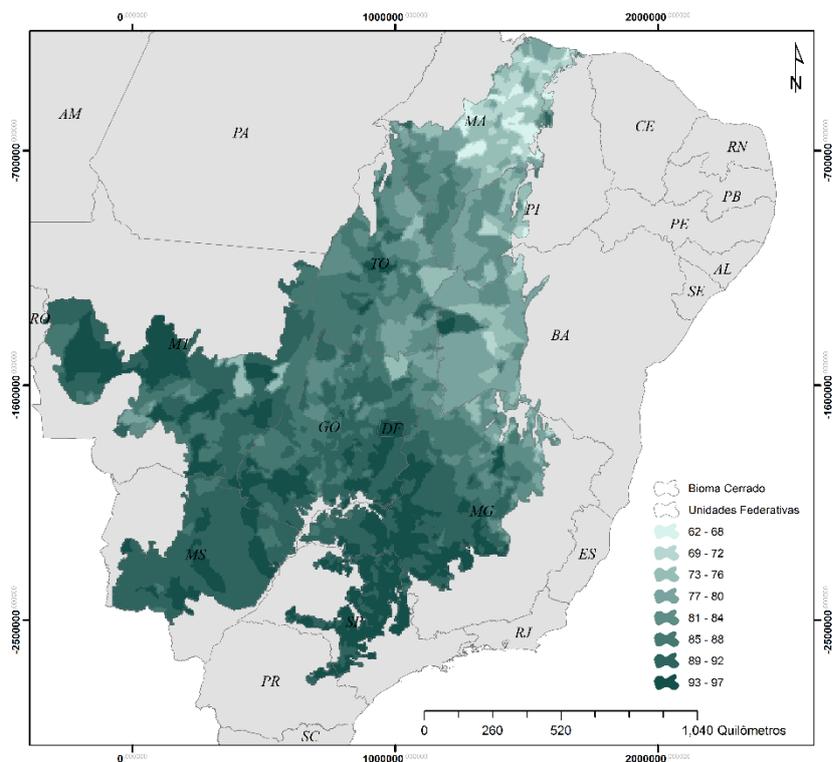


Figura 3.43 - Porcentagem de pessoas com dez anos ou mais alfabetizadas em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptado de IBGE (2010).

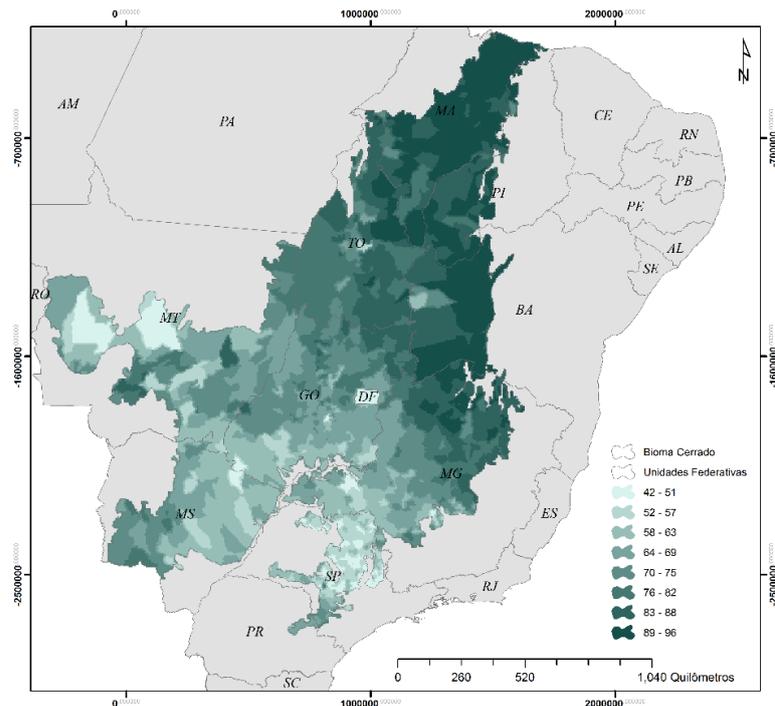


Figura 3.44 - Porcentagem de pessoas com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, considerando a porcentagem que recebe apenas benefícios do governo em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptado de IBGE (2010).

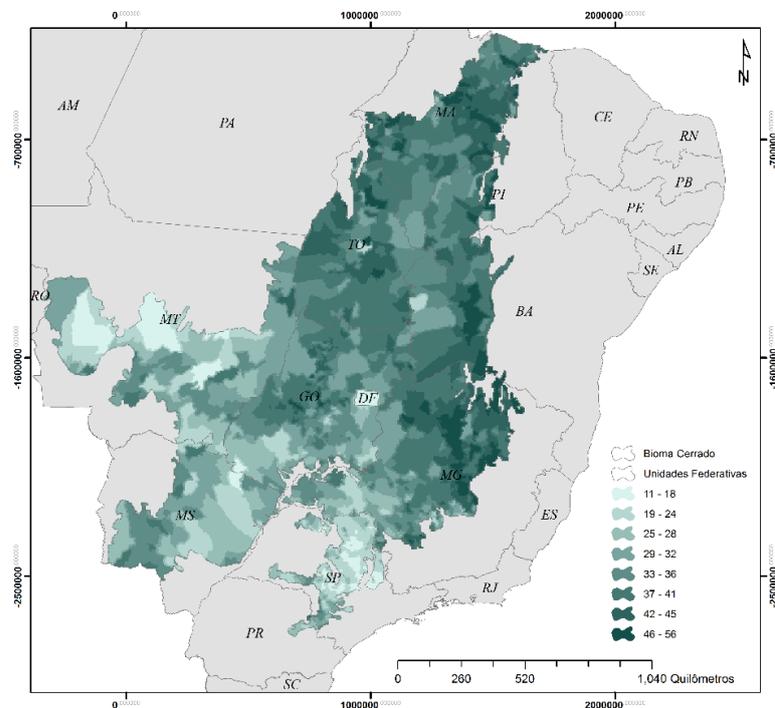


Figura 3.45 - Porcentagem de pessoas com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, desconsiderando a porcentagem que recebe apenas benefícios do governo em células de 5 x 5 km.

Fonte: adaptado de IBGE (2010).



## **4 ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO DESMATAMENTO NO CERRADO**

Este Capítulo apresenta uma análise do processo de desmatamento no Cerrado, realizada em duas etapas. Inicialmente, foi realizada uma análise dos padrões do desmatamento (acumulado até 2002, e incremento 2002-2010) por meio da análise de Kernel (DEVROYE; KRZYŻAK, 1999; SANTOS; ASSUNÇÃO, 2003). Em seguida, foi aplicada a técnica de regionalização denominada Análise de Agrupamentos (AA) (TYRON, 1939; MARDIA *et al.*, 1980) - ou Análise de *Cluster* - com o objetivo de formar grupos homogêneos das variáveis ambientais e socioeconômicas (Tabela 2.1). Por fim, foi realizado o cruzamento dos dados de desmatamento por *cluster*, visando investigar os determinantes dos caminhos do carbono na região.

Desta forma, o presente Capítulo está dividido do seguinte modo. Inicialmente, na Seção 4.1 são apresentados os métodos utilizados para a análise dos padrões do desmatamento (4.1.1) e a definição das sub-regiões (4.1.2). Posteriormente, a Seção 4.2 apresenta os resultados destes.

### **4.1 Métodos**

#### **4.1.1 Análise dos padrões de desmatamento**

A análise do padrão do desmatamento ocorrido no bioma foi realizada por meio da construção de Mapas de Kernel (DEVROYE; KRZYŻAK, 1999; SANTOS; ASSUNÇÃO, 2003) e análise do desmatamento por Estado e Tipo de Vegetação.

O estimador de Kernel tem como principal objetivo obter uma estimativa suavizada da densidade de eventos por unidade de área (DEVROYE; KRZYŻAK, 1999; SANTOS; ASSUNÇÃO, 2003). O estimador refere-se a um interpolador de dados que determina a intensidade de um evento em determinada área por meio do ajuste de uma função bidimensional sobre os eventos considerados, compondo uma superfície cujo valor será proporcional à intensidade de observações por unidade de área (CÂMARA; CARVALHO, 2004). Por ser um indicador de fácil uso e interpretação, o estimador de densidade de Kernel é útil para fornecer uma visão geral da distribuição de primeira ordem de eventos (CÂMARA; CARVALHO, 2004).

Os Mapas de Kernel foram produzidos para os diferentes dados de incremento de desmatamento descritos na seção 2.2.1 (FERREIRA *et al.*, 2007; MMA, 2009; 2011a; b;

2015b) utilizado o *software* TerraView (TERRAVIEW, 2010). O limite do bioma Cerrado foi usado como região de suporte para os mapas, sendo dividido em 100 colunas, totalizando 28.259 eventos (células retangulares). O algoritmo utilizado para o cálculo da densidade foi uma função quártica com raio adaptativo.

Além dos mapas de Kernel, foram realizadas análises da proporção do desmatamento (acumulado e incremento) por tipo de vegetação e por Estado da Federação.

#### **4.1.2 Análise do desmatamento em sub-regiões no Cerrado**

Esta atividade está subdividida em três etapas. Inicialmente é apresentado o procedimento adotado para realização de uma análise descritiva das variáveis ambientais e socioeconômicas (Seção 4.1.2.1). Então, a abordagem para identificação dos *clusters* é descrita (Seção 4.1.2.2), incluindo o cruzamento dos *clusters* com dados de desmatamento.

##### **4.1.2.1 Análise descritiva das variáveis ambientais e socioeconômicas**

Anteriormente à Análise de Agrupamentos, foram aplicadas técnicas de estatística descritiva aos dados originais com o objetivo de descrever e resumir aspectos importantes a eles associados, além de identificar possíveis anomalias (*outliers*) presentes no conjunto. Foram então obtidas medidas de tendência central (média aritmética simples), de dispersão (valores mínimo e máximo, variância e desvio padrão) e o número de observações válidas por variável.

Verificou-se também se o tamanho da amostra era adequado à realização de análises multivariadas (Análise de Agrupamentos). As técnicas multivariadas não são indicadas para amostras com número de observações inferiores a 50, devendo ser este superior ou igual a 100. Segundo HAIR *et al.* (2009), como regra geral deve-se adotar no mínimo a proporção de cinco vezes mais observações do que a quantidade de variáveis, sendo preferível a adoção da proporção de 10 a 20 vezes este número.

Foi testada a normalidade dos dados, suposição fundamental em análise multivariada (HAIR *et al.*, 2009). A distribuição de frequência das variáveis foi verificada por meio dos testes de aderência à distribuição Normal denominados Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965). Os testes geram o parâmetro “valor de prova” (valor-p) como resultado. Este parâmetro pode ser interpretado como sendo a medida do grau de concordância entre os dados e a hipótese nula ( $H_0$ ), sendo esta correspondente à

distribuição Normal. Posto isto, a distribuição Normal é possível para o conjunto de dados avaliados se o valor- $p > \alpha$ , pois nesta situação não se rejeita  $H_0$ . Em contrapartida, rejeita-se  $H_0$  caso o valor- $p \leq \alpha$ , não sendo então possível que o conjunto de dados avaliados tenha distribuição Normal.

#### 4.1.2.2 Análise de Agrupamentos (*Clusters*)

Aos conjuntos de dados socioeconômicos e ambientais foi aplicada a técnica de Análise de Agrupamentos (TYRON, 1939; MARDIA *et al.*, 1980). Trata-se de uma técnica exploratória de análise multivariada que tem como objetivo identificar grupos homogêneos (*clusters*) de observações, indivíduos ou objetos (HAIR *et al.*, 2009; MARÔCO, 2011). Cada *cluster* compreende observações com muitas características similares, porém estas características são muito diferentes quando comparadas às das observações de outros *clusters* (MOOI; SARSTEDT, 2011). Especificamente, a Análise de Agrupamentos visa classificar uma amostra de entidades em um pequeno número de grupos mutuamente excludentes e baseados nas similaridades das entidades (HAIR *et al.*, 2009).

No presente trabalho, os objetos utilizados na classificação dos agrupamentos foram as observações correspondentes às 85.379 células regulares de 25 km<sup>2</sup> que representaram o Cerrado Brasileiro, apresentadas no Capítulo 2.

As variáveis utilizadas na categorização dos objetos foram divididas em dois grupos distintos. O primeiro conjunto foi composto por cinco variáveis ambientais e objetivou representar a heterogeneidade biofísica da região. As variáveis inclusas foram: altitude média (*env\_altitude*), umidade média do solo (*env\_soil\_moisture*), porcentagem de cobertura arbórea (*env\_sa\_tree*), inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal (*env\_slope*) e distância vertical em relação à drenagem mais próxima (*env\_hand*). Já o segundo conjunto foi composto por 26 variáveis e teve como objetivo representar a diversidade socioeconômica observada no bioma. As variáveis contidas neste grupo foram divididas em cinco categorias, conforme segue:

- a) Acessibilidade a mercados: tempo de deslocamento para as principais cidades (*mkt\_accessibility*);
- b) Atratividade econômica: distância a depósitos minerais (*attrac\_dist\_mineral*), quantidade de madeira em tora produzida (*attrac\_wood*), quantidade de lenha

- produzida (*attrac\_firewood*), quantidade de carvão vegetal produzida (*attrac\_charcoal*), quantidades produzidas de soja em grão (*attrac\_soy*), cana-de-açúcar (*attrac\_sugar\_cane*), milho em grão (*attrac\_corn*) e algodão herbáceo (*attrac\_cotton*) e, por fim, o efetivo de rebanho bovino (*attrac\_cattle\_raising*);
- c) Demográficos: densidade demográfica (*demo\_dens*), proporção da população urbana (*demo\_urban*), proporção da população rural (*demo\_rural*) e porcentagem de migrantes recentes (*demo\_migr*);
- d) Tecnológicos: número médio de tratores por propriedade (*tech\_tractor*) e porcentagem de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao total de propriedades do município (*tech\_assistance*);
- e) Estrutura Agrária: porcentagem de pequenas, médias e grandes propriedades rurais em relação ao número total de propriedades do município (*agr\_nr\_small*, *agr\_nr\_medium* e *agr\_nr\_large*, respectivamente); porcentagem de pequenas, médias e grandes propriedades rurais em relação à área total de propriedades do município (*agr\_small*, *agr\_medium* e *agr\_large*, respectivamente); número de propriedades rurais com agricultura familiar e não familiar em relação ao número total de propriedades do município (*agr\_nr\_familiar* e *agr\_nr\_unfamiliar*, respectivamente) e, porcentagem de propriedades com agricultura familiar e com agricultura não familiar em relação à área total de propriedades no município (*agr\_familiar* e *agr\_unfamiliar*, respectivamente).

A homogeneização das variáveis foi obtida por meio da aplicação da transformação *rank* nas variáveis originais. Esta transformação é indicada quando a distribuição dos dados é incomum, sobretudo quando o objetivo é a realização de análises multivariadas, como neste caso (BAXTER, 1995).

O procedimento de classificação adotado trata-se de um método de particionamento iterativo não hierárquico denominado Método de k-médias. Este agrupa grandes conjuntos de dados de maneira mais rápida que os demais métodos pela rápida convergência das iterações, além de apresentar bons resultados (NEVES, 2003). O algoritmo utiliza a variação dentro dos agrupamentos como medida para formar agrupamentos homogêneos, segmentando os dados de forma a minimizar a variação dentro deles (MOOI; SARSTEDT, 2011). O critério de parada do algoritmo é a estabilização dos centróides das classes.

O número de agrupamentos foi determinado pela análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da ANOVA *one-way*, este obtido por meio da razão entre a soma dos quadrados entre grupos e a soma dos quadrados totais para as variáveis utilizadas nas Análises de Agrupamentos (MARÔCO, 2011).

Após a realização da Análise de Agrupamentos para todas as categorias de variáveis, procedeu-se à caracterização do desmatamento do Cerrado ocorrido até 2002 e no período 2002-2010. Para tal fim, foi efetuada a associação dos agrupamentos identificados na Seção 3.3.2 ao desmatamento observado nos períodos. Foram consideradas duas fontes de dados de desmatamento espacialmente explícitos, elaboradas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) (MMA, 2009; 2011a; b; 2015b) e pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás (UFG) (FERREIRA *et al.*, 2007).

## **4.2 Resultados**

Esta Seção de resultados está organizada da forma que segue. A Seção 4.2.1 apresenta os resultados obtidos na análise inicial dos padrões do desmatamento. A Seção 4.2.2 apresenta os agrupamentos identificados por categoria, e sua relação com o desmatamento.

### **4.2.1 Análise dos padrões de desmatamento**

A Figura 3.3a, apresentada no Capítulo 3, destaca a diferença entre as taxas de desmatamento entre os conjuntos de dados. Enquanto os dados D1 (MMA) apresentam taxa média anual de  $12.397 \text{ km}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ , os dados D2 (LAPIG) identificaram  $5.041 \text{ km}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ , 55% menos que D1 (2002-2010). No entanto, a comparação direta entre os dois conjuntos de dados é dificultada pois os dados do MMA apresentam o desmatamento total acumulado para o período 2002-2008, e não em base anual. Desta forma, neste estudo o período entre 2002 e 2008 é representado com valores constantes pois a extensão total desmatada no período foi igualmente distribuída entre os anos contidos neste intervalo. Depois de 2008, foi possível notar uma redução gradual da diferença entre D1 e D2, como a queda do desmatamento detectado pelo D1. Uma nova estimativa para o Cerrado recentemente produzida pelo MMA (MMA, 2015b) para o ano de 2011 identificou  $168 \text{ km}^2$  menos desmatamento do que o detectado por D2 (LAPIG) para o mesmo ano, revelando uma inversão da tendência anterior.

A Figura 4.1 apresenta a densidade de áreas desmatadas no Cerrado brasileiro no período 2002-2011, utilizando os dados de desmatamento produzidos pelo MMA (MMA, 2009; 2011a; b; 2015b).

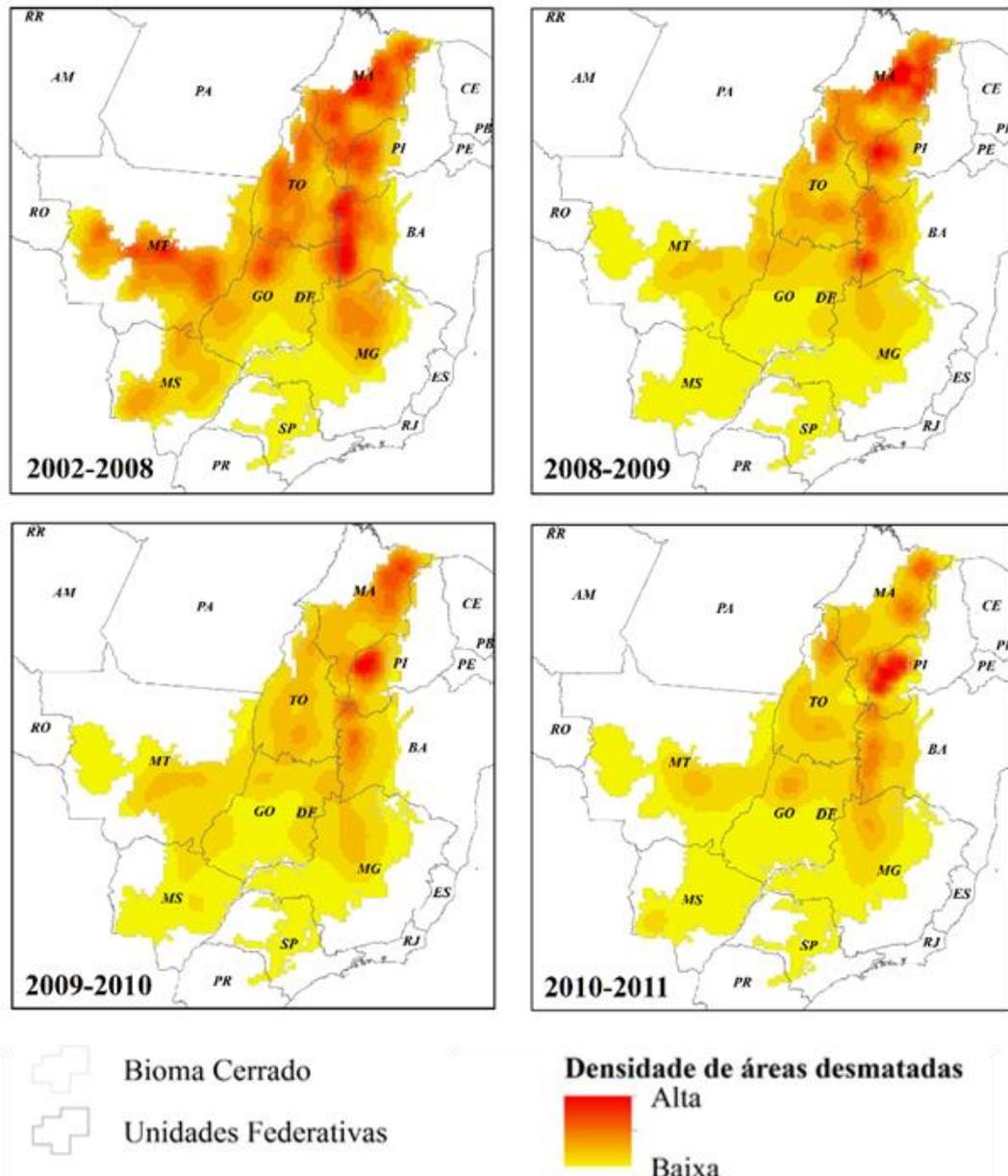


Figura 4.1 - Densidade de áreas desmatadas (Mapas de Kernel) no período de 2002-2011.

Fonte: Produção do autor.

Por sua vez, a Figura 4.2 apresenta a densidade de áreas desmatadas no período de 2003 a 2015, considerando os dados disponibilizados pelo LAPIG (FERREIRA *et al.*, 2007). Os resultados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 mostram uma incidência semelhante de

concentração de eventos de áreas desmatadas nos dados do MMA e LAPIG, sendo possível identificar duas frentes de desmatamento no Cerrado. A primeira compreende o sudeste de Mato Grosso e leste de Mato Grosso do Sul e, a segunda que vai do nordeste de Minas Gerais para o oeste da Bahia, Piauí, Tocantins e sul do Maranhão (MATOPIBA). Além disso, foi verificado maior densidade de áreas desmatadas na frente localizada na região Centro-Oeste entre os anos de 2002 a 2008. Após este período, as maiores concentrações de áreas desmatadas ocorrem principalmente na região de MATOPIBA.



Até 2010 as perdas de cobertura da vegetação natural atingiram 998.817 km<sup>2</sup>, ou 48,3% da área total do Bioma Cerrado (FERREIRA; BUSTAMANTE, 2011). O mapa elaborado para o PROBIO (SANO *et al.*, 2008) foi utilizado para avaliar as perdas totais ocorridas no bioma anteriores ao ano de 2002, por grupos de formação vegetacional (campestres, savânicas e florestais). Os resultados mostraram que 54,5% das formações campestres, 41,38% das formações savânicas e 44,16% das formações florestais foram desmatadas até o ano de 2002 (Figuras 4.3b, 4.4b e 4.5b).

A Figura 4.3a mostra a comparação entre a porcentagem de área de formações campestres desmatadas em relação ao total de áreas desmatadas nos períodos: anterior a 2002 (PROBIO) e 2002-2010 (MMA e LAPIG). É possível identificar que, o desmatamento ocorrido até o ano de 2002 foi mais distribuído em áreas de vegetação campestre (13%) do que o desmatamento ocorrido entre 2002-2010 (6% e 8% para os dados do MMA e LAPIG, respectivamente). As Figura 4.3c e 4.3d apresentam o desmatamento de formações campestres acumulado no período 2002-2010 de acordo com o MMA (MMA, 2009; 2011a; b) e LAPIG (FERREIRA *et al.*, 2007), respectivamente.

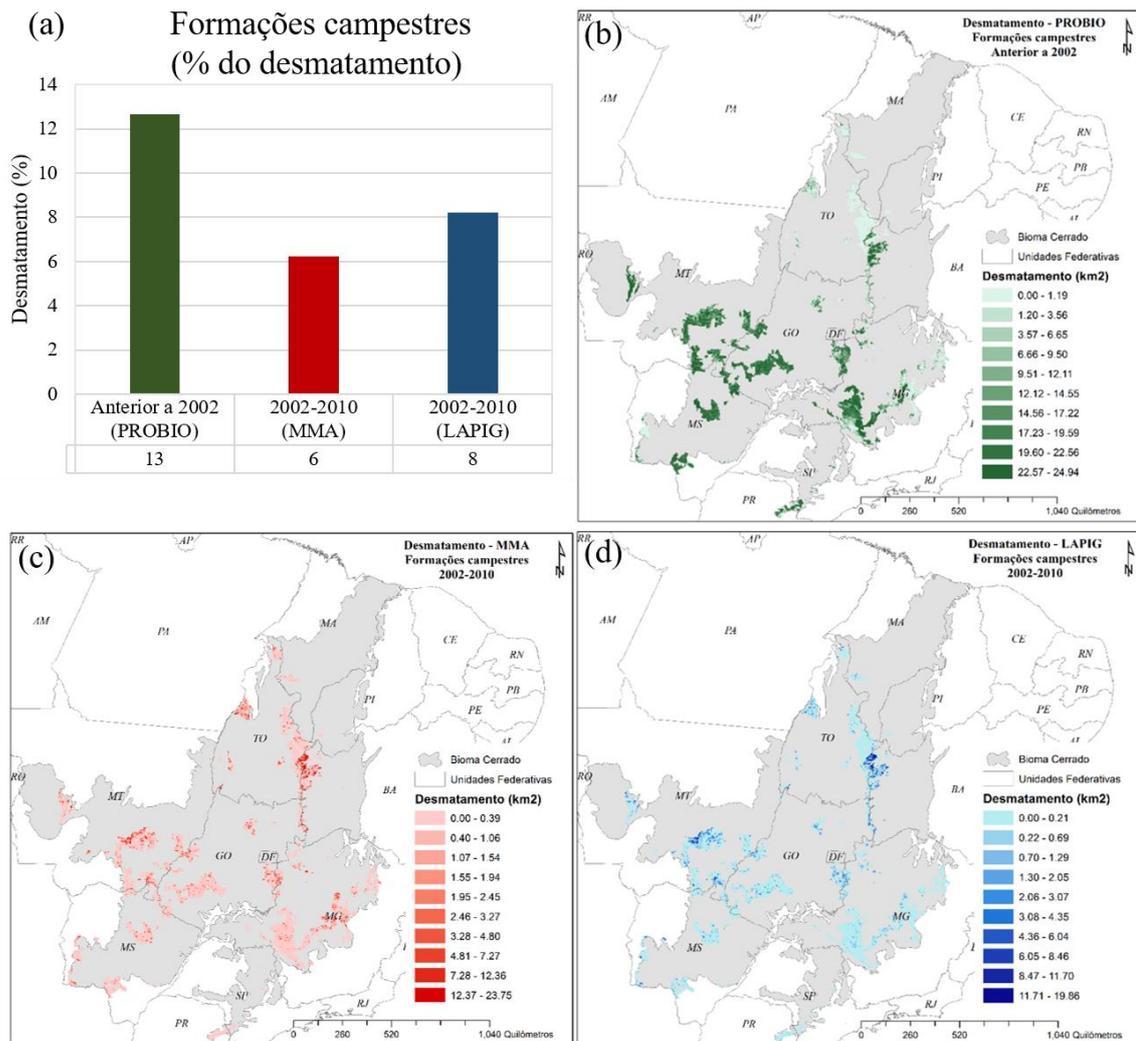


Figura 4.3 - Comparação de porcentagem de áreas de formação campestres desmatadas em relação ao total desmatado (a); Desmatamento acumulado até 2002 (PROBIO) (b); Desmatamento acumulado em formações campestres entre 2002 e 2010 de acordo com o MMA (c) e o LAPIG (d).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.4a mostra a comparação entre a porcentagem de área de formações savânicas desmatadas em relação ao total de áreas desmatadas nos períodos: anterior a 2002 (PROBIO) e 2002-2010 (MMA e LAPIG). Nesta última é observado que o desmatamento de formações savânicas até 2002 representava 52% do total desflorestado no período. Esta porcentagem aumentou entre os anos de 2002 e 2010, alcançando 56% de acordo com os dados do MMA e 62% segundo os dados LAPIG. Já as Figuras 4.4c e 4.4d apresentam o desmatamento de formações savânicas entre 2002 e 2010, contabilizados a partir dos mapas do MMA (MMA, 2009; 2011a; b) e do LAPIG (FERREIRA *et al.*, 2007), respectivamente.

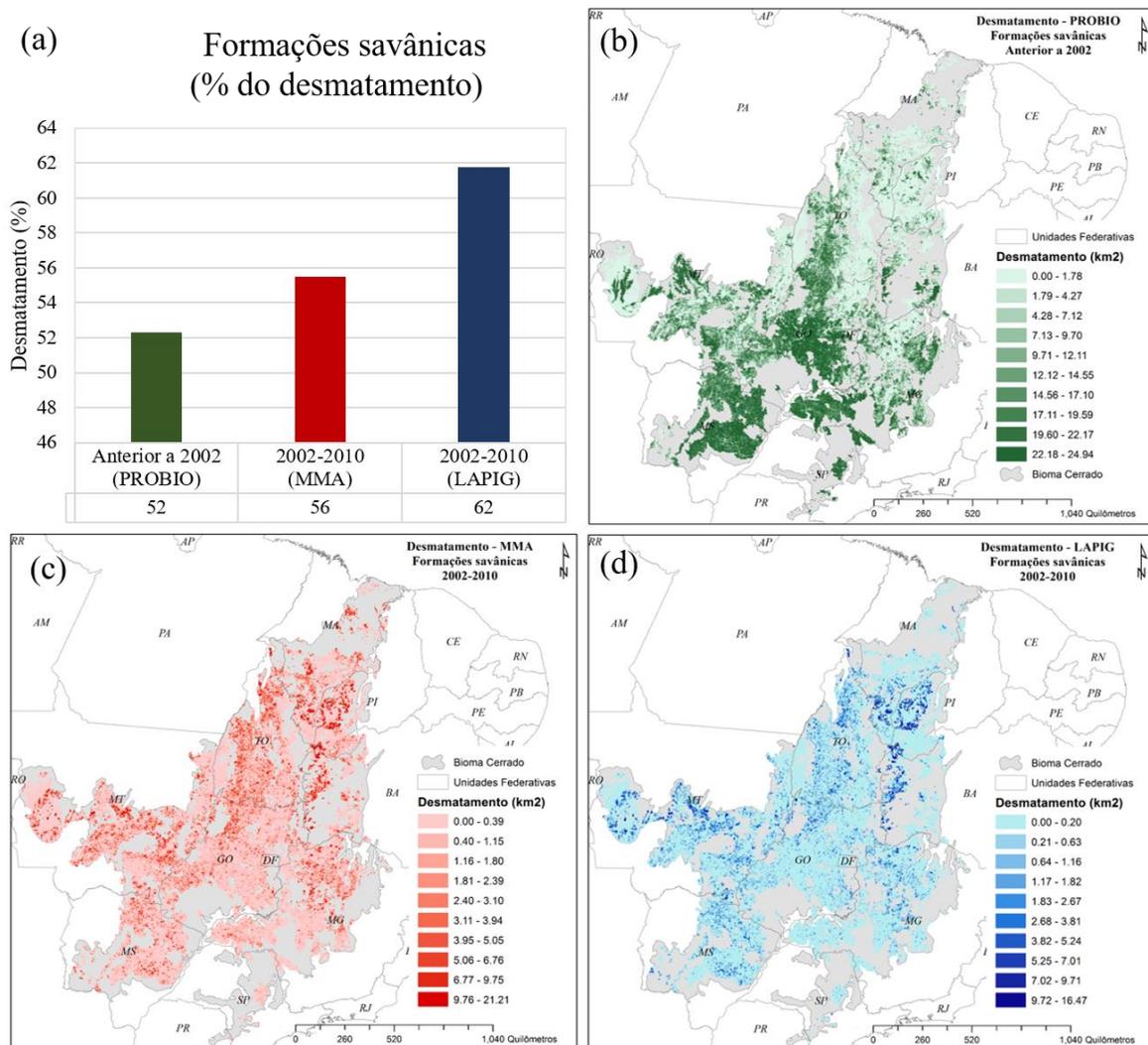


Figura 4.4 - Comparação de porcentagem de áreas de formação savânicas desmatadas em relação ao total desmatado (a); Desmatamento acumulado até 2002 (PROBIO) (b); Desmatamento acumulado em formações campestres entre 2002 e 2010 de acordo com o MMA (c) e o LAPIG (d).

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.5a mostra a comparação entre a porcentagem de área de formações florestais desmatadas em relação ao total de áreas desmatadas nos períodos: anterior a 2002 (PROBIO) e 2002-2010 (MMA e LAPIG). Comparando a porcentagem de desmatamento ocorrido nas formações florestais até o ano de 2002 do PROBIO com os referentes ao período 2002-2010 do MMA, foi possível identificar um pequeno aumento na proporção de áreas desmatadas deste grupo. Ao analisar em comparação ao dados LAPIG, foi observado uma redução destes valores. Por fim, as Figuras 4.5c e 4.5d apresentam o desmatamento mapeado pelo MMA e LAPIG nas formações florestais, respectivamente.

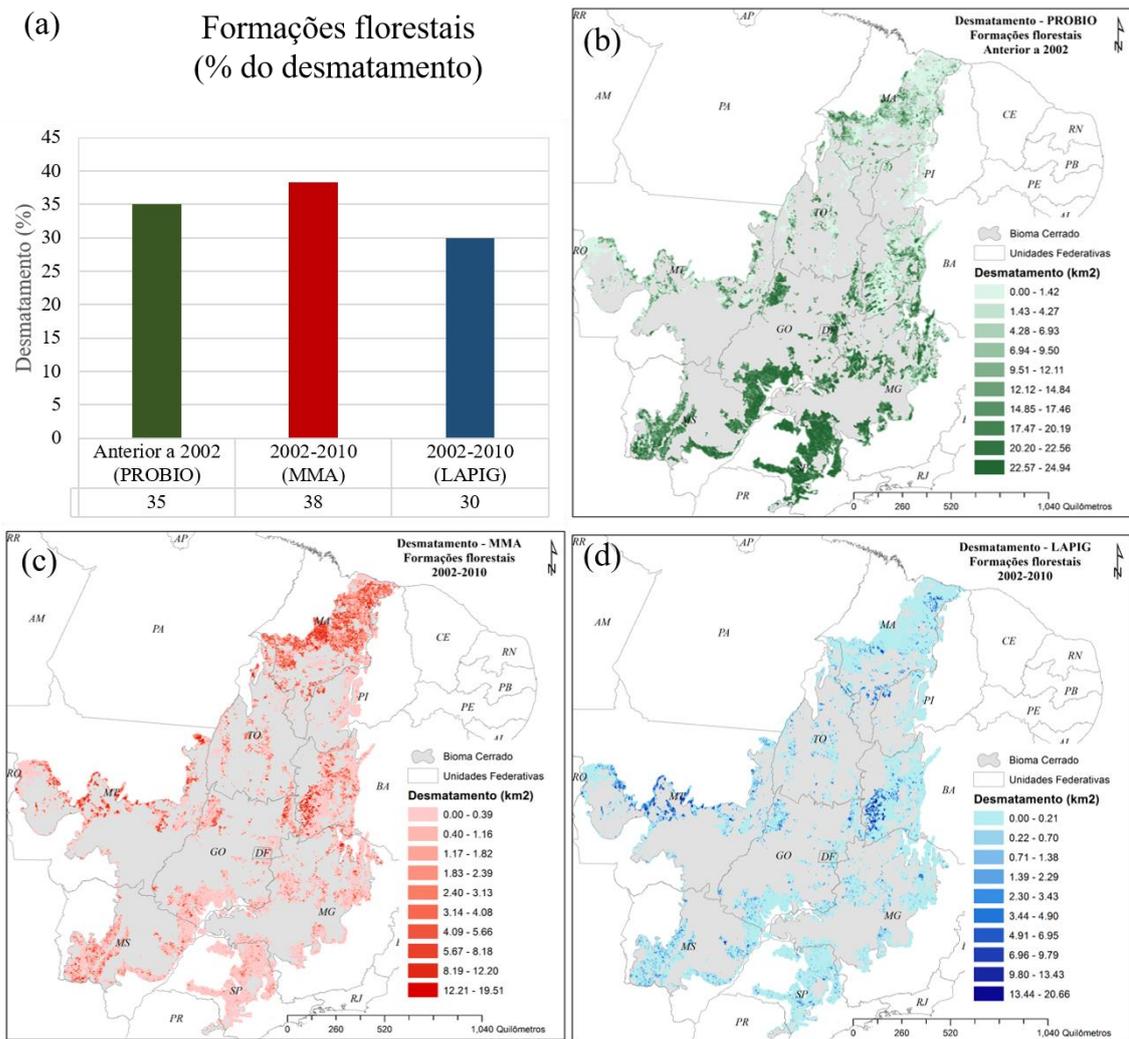


Figura 4.5 - Comparação de porcentagem de áreas de formação florestais desmatadas em relação ao total desmatado (a); Desmatamento acumulado até 2002 (PROBIO) (b); Desmatamento acumulado em formações campestres entre 2002 e 2010 de acordo com o MMA (c) e o LAPIG (d).

Fonte: Produção do autor.

Considerando os dados do MMA (MMA, 2009; 2011a; b), os resultados obtidos apontam que entre 2002 e 2010, 99.180 km<sup>2</sup> foram desmatados, e uma área acumulada de 4,86% do Cerrado tinha sido perdido. A maioria das perdas (26,54%) na última década ocorreu à custa da supressão de formações savânicas, o tipo de formação vegetacional predominante no Cerrado. Portanto, até 2010 46,27%, 69,5% e 49,54% das formações savânicas, campestres e florestais foram perdidos, respectivamente (Figuras 4.3a, 4.4a e 4.5a).

As perdas da vegetação são distribuídas de forma desigual em todo o bioma. As Unidades Federativas (UF) com maior perda da vegetação nativa até 2002 foram Goiás, Minas

Gerais, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso (Tabela 4.1). Entre 2002-2010, aproximadamente 86% das perdas foram concentradas nos estados do Mato Grosso, Maranhão, Tocantins, Bahia, Goiás e Minas Gerais, onde a fronteira agrícola avança sobre as formações savânicas e florestais.

Tabela 4.1 - Desmatamento anual (km<sup>2</sup>) do Cerrado por Unidade Federativa.

UF	Desmatamento (km <sup>2</sup> )								
	até 2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010
<b>GO</b>	206723	1716	1716	1716	1716	1716	1716	675	592
<b>MG</b>	177411	1520	1520	1520	1520	1520	1520	528	522
<b>MS</b>	155772	1113	1113	1113	1113	1113	1113	242	312
<b>MT</b>	132652	2981	2981	2981	2981	2981	2981	824	762
<b>SP</b>	70255	148	148	148	148	148	148	7	3
<b>TO</b>	50815	1843	1843	1843	1843	1843	1843	1256	936
<b>BA</b>	46643	1639	1639	1639	1639	1639	1639	1025	716
<b>MA</b>	33586	2479	2479	2479	2479	2479	2479	2396	1638
<b>PI</b>	9393	720	720	720	720	720	720	682	982
<b>DF</b>	4512	18	18	18	18	18	18	1	5
<b>PR</b>	2827	0	0	0	0	0	0	1	1
<b>PA</b>	42	2	2	2	2	2	2	0	0
<b>RO</b>	5	1	1	1	1	1	1	0	0

Fonte: Produção do autor.

As formações campestres tiveram maiores perdas no período anterior a 2002 no estados do Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Bahia. No mesmo período, os estados que menos desmataram a formação em relação aos demais estados foram o Paraná, Tocantins, São Paulo, Maranhão Distrito Federal, Paraná e Piauí (Tabela 4.2). No mesmo período (anterior a 2002), as formações savânicas perderam maior área nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Tocantins, Bahia e Maranhão. Já os estados que menos desmataram a formação, no mesmo período, foram São Paulo, Piauí, Distrito Federal, Paraná, Pará e Rondônia (Tabela 4.3). Em último, até 2002 as formações florestais sofreram maior perda de área nos estados de São Paulo, Piauí, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Bahia, Maranhão, Mato Grosso e Tocantins. Por outro lado, os estados que menos desmataram a formação o Piauí, Distrito Federal, Paraná, Pará e Rondônia (Tabela 4.4).

Tabela 4.2 - Desmatamento (km<sup>2</sup>) de áreas de formação campestres, por Unidade Federativa, onde: BA é Bahia, DF Distrito Federal, GO Goiás, MA Maranhão, MG Minas Gerais, MS Mato Grosso do Sul, MT Mato Grosso, PA Pará, PI Piauí, PR Paraná, SP São Paulo e TO é Tocantins.

Formação Vegetacional	UF	Desmatamento (km <sup>2</sup> )									Total geral	
		até 2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010		
Campestre	BA	6740	240	240	240	240	240	240	79	75	8335	
	MT	29889	216	216	216	216	216	216	36	58	31276	
	MG	28953	161	161	161	161	161	161	57	67	30046	
	GO	26222	130	130	130	130	130	130	61	61	27125	
	TO	1649	107	107	107	107	107	107	87	69	2448	
	MS	16357	57	57	57	57	57	57	10	12	16723	
	MA	30	3	3	3	3	3	3	2	0	50	
	SP	1368	1	1	1	1	1	1	0	0	1374	
	DF	30	0	0	0	0	0	0	0	0	30	
	PR	1697	0	0	0	0	0	0	0	1	1699	
	PA	13	0	0	0	0	0	0	0	0	13	
	PI	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
	<b>Total</b>	<b>112953</b>	<b>916</b>	<b>333</b>	<b>343</b>	<b>119123</b>						

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 - Desmatamento (km<sup>2</sup>) de áreas de formação savânicas, por Unidade Federativa, onde: BA é Bahia, DF Distrito Federal, GO Goiás, MA Maranhão, MG Minas Gerais, MS Mato Grosso do Sul, MT Mato Grosso, PA Pará, PI Piauí, PR Paraná, SP São Paulo e TO é Tocantins.

Formação Vegetacional	UF	Desmatamento (km <sup>2</sup> )									Total geral
		até 2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	
Savânicas	MT	81515	1783	1783	1783	1783	1783	1783	638	582	<b>93434</b>
	TO	38643	1386	1386	1386	1386	1386	1386	943	739	<b>48641</b>
	GO	123819	1144	1144	1144	1144	1144	1144	465	374	<b>131524</b>
	MG	88955	944	944	944	944	944	944	338	359	<b>95317</b>
	PI	6928	617	617	617	617	617	617	562	923	<b>12114</b>
	MA	10526	688	688	688	688	688	688	490	369	<b>15513</b>
	BA	16832	660	660	660	660	660	660	460	340	<b>21592</b>
	MS	87400	600	600	600	600	600	600	153	176	<b>91327</b>
	SP	8794	17	17	17	17	17	17	4	0	<b>8897</b>
	DF	2411	15	15	15	15	15	15	0	4	<b>2503</b>
	PA	13	1	1	1	1	1	1	0	0	<b>20</b>
	RO	4	1	1	1	1	1	1	0	0	<b>8</b>
	PR	103	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>103</b>
	<b>Total</b>	<b>465942</b>	<b>7855</b>	<b>4054</b>	<b>3866</b>						

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.4 - Desmatamento (km<sup>2</sup>) de áreas de formação florestais, por Unidade Federativa, onde: BA é Bahia, DF Distrito Federal, GO Goiás, MA Maranhão, MG Minas Gerais, MS Mato Grosso do Sul, MT Mato Grosso, PA Pará, PI Piauí, PR Paraná, SP São Paulo e TO é Tocantins.

Formação Vegetacional	UF	Desmatamento (km <sup>2</sup> )									Total geral
		até 2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	
Florestais	MA	23030	1789	1789	1789	1789	1789	1789	1904	1268	<b>36933</b>
	MT	21249	982	982	982	982	982	982	150	123	<b>27413</b>
	BA	23070	739	739	739	739	739	739	485	300	<b>28288</b>
	GO	56682	442	442	442	442	442	442	149	157	<b>59638</b>
	MS	52015	456	456	456	456	456	456	79	124	<b>54955</b>
	MG	59503	414	414	414	414	414	414	133	97	<b>62217</b>
	TO	10523	350	350	350	350	350	350	226	128	<b>12975</b>
	PI	2460	103	103	103	103	103	103	120	59	<b>3257</b>
	SP	60093	131	131	131	131	131	131	4	3	<b>60885</b>
	DF	2072	4	4	4	4	4	4	0	1	<b>2095</b>
	PA	16	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>19</b>
	PR	1027	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1027</b>
	RO	1	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
<b>Total</b>		<b>311740</b>	<b>5409</b>	<b>5409</b>	<b>5409</b>	<b>5409</b>	<b>5409</b>	<b>5409</b>	<b>3251</b>	<b>2260</b>	<b>349702</b>

Fonte: Produção do autor.

Considerando os dados de desmatamento relacionados ao período 2002-2010 fornecidos pelo MMA, foi verificado que os estados que mais desmataram as formações campestres foram o da Bahia, Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás e Tocantins. Diferentemente, os estados com menor perda de áreas naturais desta formação no período foram o Mato Grosso do Sul, Maranhão, São Paulo, Paraná e Distrito Federal. Não foi verificado desmatamento nos estados do Piauí e Pará neste período (Tabela 4.2). Dentre os estados que mais desmataram as formações savânicas entre 2002-2010 estão o Mato Grosso, Tocantins, Goiás, Minas Gerais, Piauí, Maranhão, Bahia e Mato Grosso do Sul. Por outro lado, os que menos desmataram estas formações foram São Paulo, Distrito Federal, Pará e Rondônia. Não foi constatado desmatamento neste período no estado do Paraná (Tabela 4.3). Já as formações florestais, sofreram maior perda da vegetação original nos estados do Maranhão, Mato Grosso, Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Tocantins. Já os estados com menor perda foram o Piauí, São Paulo, Distrito Federal, Pará e Paraná. Em Rondônia não foi detectado desmatamento no período 2002-2010 (Tabela 4.4).

#### 4.2.2 Análise do desmatamento em sub-regiões no Cerrado

##### 4.2.2.1 Análise descritiva das variáveis do banco de dados

As Tabelas 4.5 e 4.6 resumem os resultados obtidos com a análise descritiva do conjunto de variáveis ambientais e socioeconômicas, respectivamente. Nelas são apresentados os valores mínimo e máximos de cada variável, a média aritmética simples, desvio padrão, variância e o número de observações válidas. Mediante a inspeção dos valores contidos nas Tabelas, não foi verificado a presença de anomalias no conjunto de dados. Por outro lado, foi verificado que algumas variáveis apresentam alta variância, ou seja, os dados apresentam alta dispersão dos valores observados em relação à sua média. Todas as variáveis presentes nos dois conjuntos de dados tem natureza métrica e constituem um conjunto homogêneo.

Tabela 4.5 - Medidas de tendência central e de dispersão e número de observações válidas (N) por variável ambiental.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância	N
<i>env_altitude</i>	0	1566	500	238349	56810	85379
<i>env_hand</i>	0	783	55	52527	2759	85379
<i>env_sa_tree</i>	0	89	25	12549	157	85379
<i>env_slope</i>	0	1928910	207044	166196658	27621329231	85379
<i>env_soil_moisture</i>	31	68	39	3761	14	85379

Fonte: Produção do autor.

O número de observações válidas para todas as variáveis, tanto ambientais quanto socioeconômicas, foi de 85.379. Este número corresponde ao número total de células regulares que representaram espacialmente o Cerrado brasileiro, e indica que nenhuma observação foi perdida durante o tratamento dos dados para realização das análises.

Sobre a adequação do tamanho da amostra, o valor de 85.739 observações deste estudo satisfaz a regra geral do tamanho da amostra para realização de análises multivariadas, tanto para o conjunto de variáveis ambientais quanto para o de socioeconômicas. Considerando que o número de observações deve ser 20 vezes superior ao número de variáveis (HAIR *et al.*, 2009), seriam necessárias 120 observações de dados ambientais (seis variáveis) e 520 observações de dados socioeconômicos (26 variáveis). O tamanho da amostra utilizada foi aproximadamente 711 e 165 vezes superior ao número mínimo necessário para os dados ambientais e socioeconômicos, respectivamente.

Tabela 4.6 - Medidas de tendência central e de dispersão e número de observações válidas (N) por variável socioambiental.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância	N
<i>agr_familiar</i>	0	62	10	8	59	85379
<i>agr_large</i>	0	100	73	19	355	85379
<i>agr_medium</i>	0	59	16	13	158	85379
<i>agr_nr_familiar</i>	0	99	67	20	384	85379
<i>agr_nr_large</i>	0	25	3	4	14	85379
<i>agr_nr_medium</i>	0	30	4	4	14	85379
<i>agr_nr_small</i>	46	100	93	7	45	85379
<i>agr_nr_unfamiliar</i>	0	87	11	9	75	85379
<i>agr_small</i>	0	72	11	9	77	85379
<i>agr_unfamiliar</i>	0	1685	93	112	12435	85379
<i>attrac_cattle_raising</i>	92	1727475	134815	176468	31140942794	85379
<i>attrac_charcoal</i>	0	64029	2447	5928	35140349	85379
<i>attrac_corn</i>	0	597136	30671	78376	6142830735	85379
<i>attrac_cotton</i>	0	411231	9292	42113	1773493880	85379
<i>attrac_dist_mineral</i>	0	248887	53064	42040	1767360522	85379
<i>attrac_firewood</i>	0	676843	16033	46586	2170223706	85379
<i>attrac_soy</i>	0	1401719	71481	161266	26006765671	85379
<i>attrac_sugar_cane</i>	0	7248703	113843	447653	200393092154	85379
<i>attrac_wood</i>	0	300335	2115	11210	125664564	85379
<i>demo_dens</i>	0	7012	16	83	6847	85379
<i>demo_migr</i>	5	74	37	15	235	85379
<i>demo_rural</i>	0	88	32	18	333	85379
<i>demo_urban</i>	12	100	68	18	333	85379
<i>mkt_accessibility</i>	0	3600	274	232	53710	85379
<i>tech_assistance</i>	0	98	29	21	420	85379
<i>tech_tractor</i>	0	80	4	9	72	85379

Fonte: Produção do autor.

#### 4.2.2.2 Análise de agrupamentos (*Clusters*)

A Tabela 4.7 apresenta a comparação do  $R^2$  e do ganho de variabilidade dos conjuntos de dados. Para as categorias foram realizadas quatro Análises de Agrupamentos, variando o número de *clusters* desejado (2, 3, 4 e 5). Posteriormente, com os resultados obtidos nestas análises foi realizado o teste de comparação de médias ANOVA *one way*, calculados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para cada número de agrupamentos e o ganho de variabilidade com a adição de um novo *clusters*.

Tabela 4.7 Definição do número de agrupamentos para cada categoria de variável.

Categoria	Número de Agrupamentos	$R^2$	Ganho de variabilidade
Ambientais	2	0,2993	-
	3	0,4004	<b>0,1011</b>
	4	0,4723	0,0719
	5	0,5209	0,0486
Acessibilidade a mercados	2	0,2698	-
	3	0,3591	<b>0,0893</b>
	4	0,4192	0,0601
	5	0,4699	0,0507
Atratividade econômica	2	0,1905	-
	3	0,3262	<b>0,1358</b>
	4	0,4035	0,0772
	5	0,4422	0,0387
Demográficos	2	0,4022	-
	3	0,5721	<b>0,1699</b>
	4	0,6447	0,0726
	5	0,6912	0,0465
Tecnológicos	2	0,5663	-
	3	0,7364	<b>0,1701</b>
	4	0,7965	0,0601
	5	0,8269	0,0304
Estrutura agrária	2	0,4206	-
	3	0,5260	<b>0,1055</b>
	4	0,6180	0,0920
	5	0,6597	0,0416
Sociais e econômicos	2	0,5781	-
	3	0,7128	<b>0,1347</b>
	4	0,7754	0,0626
	5	0,8106	0,0352

Fonte: Produção do autor.

A partir da identificação do maior ganho de variabilidade, foi possível determinar o número ideal de três agrupamentos para todos as categorias de variáveis.

O restante desta seção apresenta os resultados referentes à caracterização dos desmatamentos observados no Bioma Cerrado até o ano de 2002 e no período de 2002 a 2010. Esta se deu por meio da associação dos agrupamentos identificados ao desmatamento observado no período. Foram consideradas duas fontes de dados de desmatamento espacialmente explícitos, elaboradas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) (MMA, 2009; 2011a; b; 2015b) e pelo Laboratório de Processamento de Imagens (LAPIG) e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (UFG) (FERREIRA *et al.*, 2007). Os dados providos pelo MMA e LAPIG mostram o desmatamento de 99.180 km<sup>2</sup> e 40.331 km<sup>2</sup> no período, respectivamente.

#### 4.2.2.3 Agrupamento das variáveis ambientais e caracterização do desmatamento

Considerando os agrupamentos obtidos com as variáveis ambientais, do total de 85.739 observações (células regulares), 27,3% (23.279 células) correspondeu ao Agrupamento 1, 38,7% (33.011 células) ao Agrupamento 2 e, 34,1% (29.089 células) ao Agrupamento 3.

Os centros finais dos *clusters*, apresentados na Tabela 4.8, permitem inferir sobre as contribuições das variáveis utilizadas na sua composição. O Agrupamento 1 foi formado pelas regiões que apresentam os maiores valores de inclinação da superfície do terreno em relação à horizontal (*env\_slope*), de distância vertical em relação à drenagem mais próxima (*env\_hand*) e de altitude média (*env\_altitude*). O grupo apresenta valores médios de umidade média do solo (*env\_soil\_moisture*) e porcentagem de cobertura arbórea (*env\_sa\_tree*). Desta forma, o Agrupamento 1 representa áreas montanhosas, com baixa umidade do solo e pouca cobertura arbórea.

Tabela 4.8 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis ambientais.

Variável	Centros finais		
	1	2	3
<i>env_altitude</i>	0,65	-0,77	0,36
<i>env_soil_moisture</i>	-0,19	-0,49	0,71
<i>env_sa_tree</i>	0,15	0,56	-0,76
<i>env_slope</i>	1,03	-0,79	0,07
<i>env_hand</i>	1,02	-0,73	0,01

Fonte: Produção do autor.

O Agrupamento 2 foi formado por áreas mais planas, o que pode ser observado pelos menores valores observados de altitude média (*env\_altitude*) e inclinação do terreno (*env\_slope* e *env\_hand*). A região apresenta os maiores valores de cobertura arbórea (*env\_sa\_tree*) dentre os três clusters e os menores valores de umidade média do solo (*env\_soil\_moisture*). Já o Agrupamento 3, contém as regiões com os maiores valores de cobertura arbórea e os maiores valores de umidade do solo, em comparação aos demais *clusters*. Neste agrupamento, as variáveis que representam a altitude e inclinação apresentaram valores médios. A Figura 4.6 apresenta os valores finais de centro dos três agrupamentos.

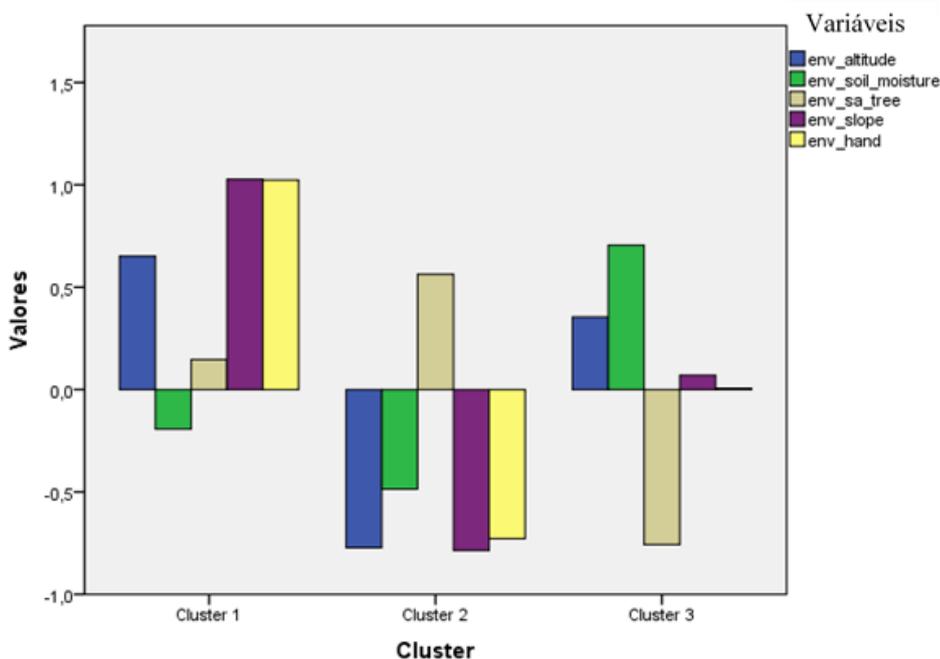


Figura 4.6 - Valores finais de centro dos agrupamento (*clusters*) das variáveis ambientais.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.7 apresenta a distribuição espacial dos agrupamentos identificados com as variáveis ambientais. O Agrupamento 2 inclui mormente a porção centro-norte do bioma, enquadrando o entorno do Arco do Desmatamento e frações da região de MATOPIBA. O Agrupamento 3 abrange áreas localizadas principalmente na porção centro-sul e oeste do bioma. Finalmente, o Agrupamento 1 ocupa áreas intermediárias entre os dois clusters, além da seção central da região de MATOPIBA.

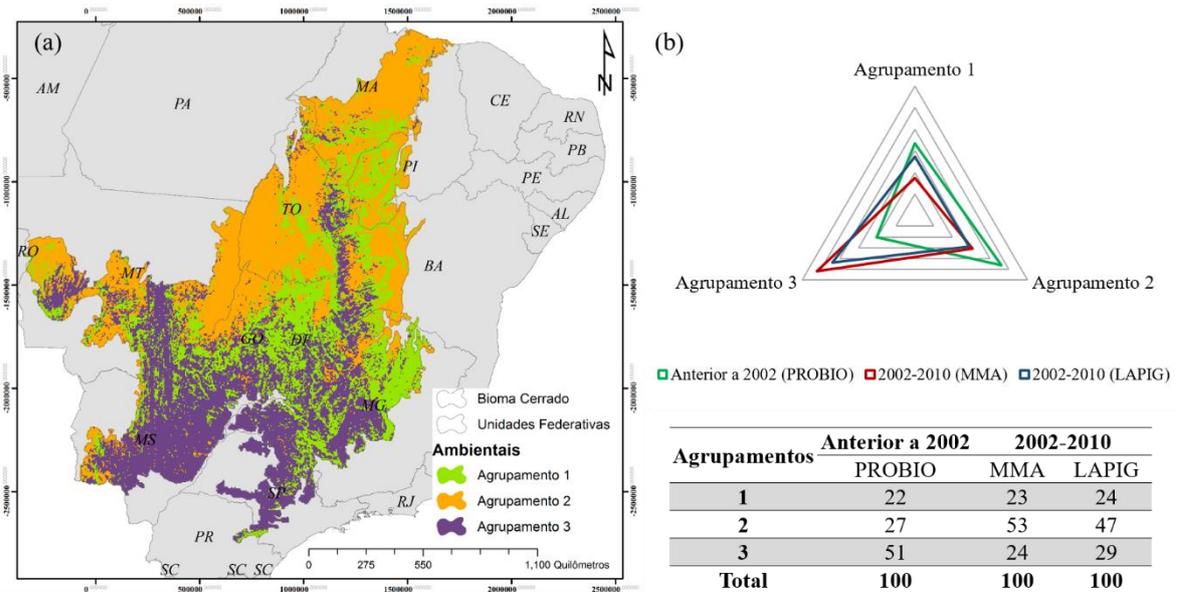


Figura 4.7 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis ambientais e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).

Fonte: Produção do autor.

De acordo com os dados do PROBIO (SANO *et al.*, 2008), o desmatamento ocorrido antes do ano de 2002 foi localizado sobretudo no Agrupamento 3 (51%). O restante ficou distribuído entre os Agrupamentos 1 (22%) e 2 (27%). Considerando os agrupamentos formados pelas variáveis ambientais e os dados de desmatamento elaborados pelo MMA para o período 2002-2010 (MMA, 2009; 2011a; b), temos que 23% (23.123 km<sup>2</sup>) do total desflorestado no período 2002-2010 está localizado dentro dos limites do Agrupamento 1, 53% (52.191 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e, 24% (23.866 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3. Ao considerar os dados fornecidos pelo LAPIG, foi observado que 24% (9.624 km<sup>2</sup>) do total desmatado no período está distribuído no Agrupamento 1, 47% (18.859 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e, 29% (11.848 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3 (Figura 4.7b).

As Figuras 4.6 e 4.7 mostraram que aproximadamente a metade (51%) do desmatamento ocorrido até o ano de 2002 foi localizado no Agrupamento 3. Este agrupamento caracteriza áreas com alta umidade do solo, médias altitudes e com baixa cobertura arbórea, estando localizado principalmente na porção sul e centro-oeste do Bioma Cerrado. Por outro lado, as áreas desmatadas no período 2002-2010 foram concentradas sobretudo dentro dos limites do Agrupamento 2, *cluster* que concentra as áreas com baixas altitudes, topografia plana e com a maior cobertura arbórea do Cerrado. De acordo com os dados do MMA e

LAPIG, 53% e 47% das áreas desmatadas no período estavam dentro do segundo cluster, respectivamente. Rocha *et al.* (2011) também chegaram a resultados semelhantes quando analisaram os padrões e tendências do desmatamento entre 2002 e 2009. De acordo com os autores, 95% das áreas desmatadas no período avaliado ocorreram em locais com topografia plana e suavemente ondulada, apresentando declividade oscilando entre 0 e 8%. Além disso, constataram que 90% do desmatamento ocorreram sobre as fitofisionomias mais densas do bioma: 27,79% em Savana Arborizada sem Floresta de Galeria, 21,85% em Savana Arborizada com Floresta de Galeria, 13,88% em Savana Parque com Floresta de Galeria, 10,26% Savana Florestada, 8,96% Floresta Estacional Semidecidual Submontana, 7,60% em áreas de Savana Parque sem Floresta de Galeria (ROCHA *et al.*, 2011).

#### **4.2.2.4 Agrupamentos das variáveis socioeconômicas e caracterização do desmatamento**

##### **4.2.2.4.1 Fatores de acessibilidade a mercados**

Os resultados obtidos com as variáveis da categoria acessibilidade a mercados mostram que 35,1% das células (29.978 observações) foram retidas no Agrupamento 1, 28,3% (24.136 observações) no Agrupamento 2 e, 36,6% (31.265 observações) no Agrupamento 3.

A Tabela 4.9 mostra os centros finais de cada agrupamento e a contribuição das variáveis da categoria. Nela pode ser observado que, o Agrupamento 1 apresenta maiores valores das variáveis *mkt\_dist\_roads*, *mkt\_dist\_paved\_roads*, *mkt\_dist\_unpaved\_roads*, *mkt\_dist\_urban* e *mkt\_acessibility*. Desta forma, este *cluster* representa áreas com maior facilidade de acesso aos mercados consumidores em relação aos demais *clusters*. Por sua vez, o Agrupamento 2 engloba as regiões com os menores valores de acessibilidade (*mkt\_dist\_roads*, *mkt\_dist\_paved\_roads*, *mkt\_dist\_urban*, *mkt\_dist\_rivers* e *mkt\_acessibility*) observados no Cerrado Brasileiro. Por fim, o Agrupamento 3 é formado por regiões com características intermediárias entre os dois primeiros *clusters*.

Tabela 4.9 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam a acessibilidade a mercados.

Variável	Centros finais dos <i>clusters</i>		
	1	2	3
<i>mkt_dist_roads</i>	0,88	-0,69	-0,32
<i>mkt_dist_paved_roads</i>	0,76	-1,05	0,08
<i>mkt_dist_unpaved_roads</i>	0,53	0,37	-0,80
<i>mkt_dist_urban</i>	0,77	-0,78	-0,13
<i>mkt_dist_rivers</i>	0,03	-0,11	0,05
<i>mkt_accessibility</i>	0,74	-0,93	0,01

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.8 apresenta os valores finais de centro dos três agrupamentos.

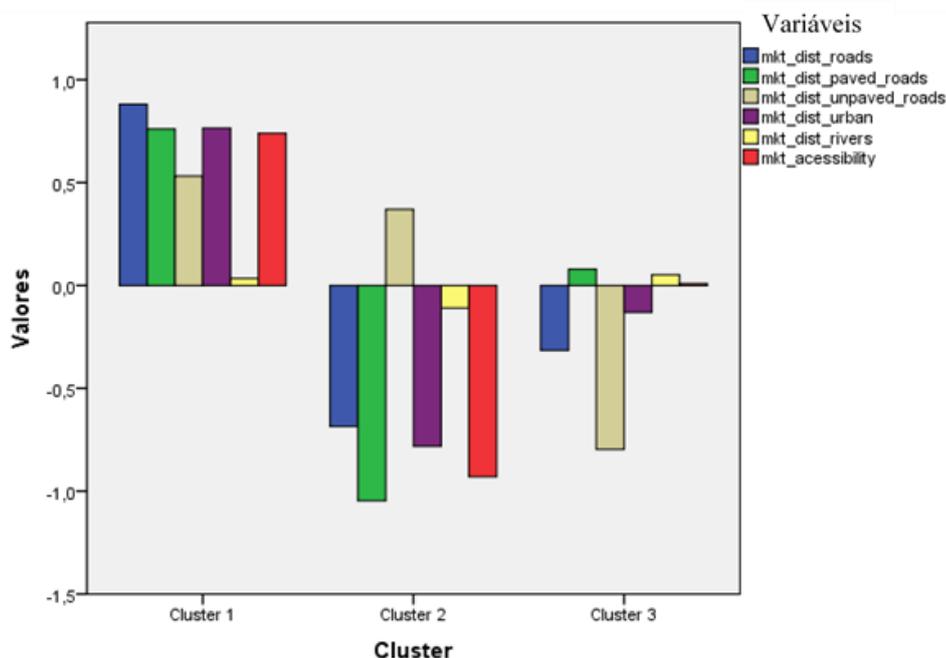


Figura 4.8 - Valores finais de centro dos agrupamento (*clusters*) das variáveis que representam a acessibilidade a mercados.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.9 apresenta a distribuição espacial do *clusters* formados com as variáveis que representam os fatores associados à acessibilidade aos mercados consumidores. Nela pode ser observado que o Agrupamento 1, representado por regiões com menor acessibilidade aos mercados, ocupa principalmente as porções norte de Minas Gerais, região de MATOPIBA e entorno do Arco do Desmatamento. Já o Agrupamento 2, que encerra regiões com alta acessibilidade aos mercados, ocupa sobretudo as regiões do bioma

contidas nos estados de Minas Gerais e São Paulo, além do entorno das capitais dos demais estados.

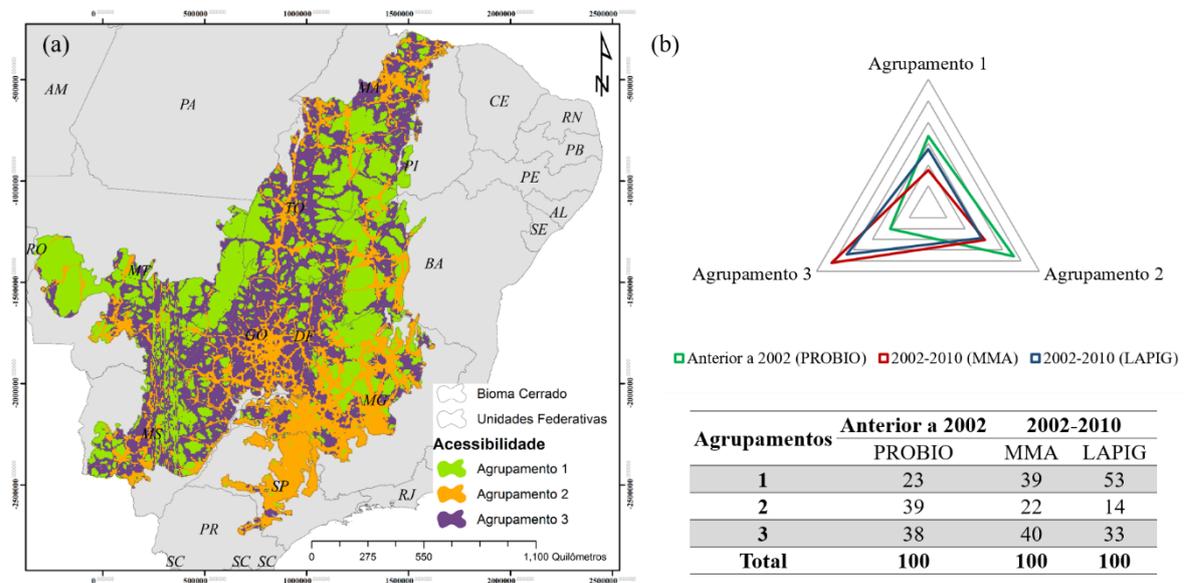


Figura 4.9 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis de acessibilidade a mercados e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).

Fonte: Produção do autor.

A análise da correspondência entre os agrupamentos identificados com as variáveis relacionadas aos fatores de acessibilidade a mercados e o desmatamento reportado pelo PROBIO, mostrou que antes de 2002 39% ocorreu no Agrupamento 2, 38% no Agrupamento 3 e 23% no Agrupamento 1. De acordo com os dados do MMA, 39% (38.487 km<sup>2</sup>) do total desmatado no período 2002-2010 estavam contidos no Agrupamento 1, 22% (21.430 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e, 40% (39.263 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3. Quando os dados elaborados pelo LAPIG são considerados, é observado que 53% (21.351 km<sup>2</sup>) do total está distribuído no Agrupamento 1, 14% (5.656 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e, 33% (13.324 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3 (Figura 4.9b).

Considerando as características de acessibilidade a mercados observadas no bioma e o desmatamento ocorrido até 2002, foi constatado que as maiores concentrações destes eventos foram localizados nos Agrupamentos 2 (39%) e 3 (38%), que caracterizam respectivamente áreas com alta e média acessibilidade a mercados. Este padrão está de acordo com o observado para o desmatamento na Amazônia, onde a implantação de rodovias e de polos de desenvolvimento na década de 1970 incentivou o desmatamento no bioma (ALVES, 2001; 2002; AGUIAR, 2006). Analisando o período de 2002 a 2010, os

dados do MMA mostraram que a maior parte das áreas desflorestadas foram localizadas nos Agrupamentos 3 e 1, com 40% e 39% do total. Já os dados LAPIG apontaram que mais da metade (53%) do desmatamento ocorrido no período foi localizado em áreas com características que indicam baixa acessibilidade a mercados, diferentemente do observado para o período anterior a 2002 e o desmatamento ocorrido na Amazônia.

#### 4.2.2.4.2 Fatores de atratividade econômica

Por sua vez, os resultados obtidos com a análise das variáveis da categoria atratividade econômica mostraram que 42,7% das observações (36.419 células) foram agrupadas no Agrupamento 1, 41,5% (35.391 células) no Agrupamento 2 e, 15,9% (13.569 células) no Agrupamento 3.

A Tabela 4.10 apresenta a formação dos três clusters obtidos pela análise das variáveis que representam a atratividade econômica das regiões que compõem o Cerrado. O primeiro agrupamento representa áreas com maior produção de madeira em tora e lenha (*attrac\_wood* e *attract\_firewood*), maior proximidade à depósitos minerais e com as menores produções de carvão, soja, cana-de-açúcar, milho, algodão e pecuária (*attrac\_charcoal*, *attrac\_soy*, *attrac\_sugar\_cane*, *attrac\_corn*, *attrac\_cotton* e *attrac\_cattle\_raising*). As regiões representadas pelo Agrupamento 2 apresentam os menores valores de produção de madeira em tora e madeira para lenha e as maiores distâncias aos depósitos minerais. Dentre os três *clusters*, é o que abriga a maior produção de cana-de-açúcar. Já o Agrupamento 3, representa as áreas com maiores produção de carvão vegetal, soja, milho, algodão e pecuária.

Tabela 4.10 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam a atratividade econômica.

Variável	Centros finais dos <i>clusters</i>		
	1	2	3
<i>attrac_dist_mineral</i>	0,42	-0,51	0,20
<i>attrac_wood</i>	0,59	-0,75	0,38
<i>attract_firewood</i>	0,59	-0,75	0,38
<i>attrac_charcoal</i>	-0,12	0,08	0,12
<i>attrac_soy</i>	-0,31	-0,29	1,59
<i>attrac_sugar_cane</i>	-0,56	0,43	0,38
<i>attrac_corn</i>	-0,37	-0,15	1,38
<i>attrac_cotton</i>	-0,40	-0,36	2,02
<i>attrac_cattle_raising</i>	-0,32	0,21	0,29

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.10 apresenta os valores finais de centro destes agrupamentos.

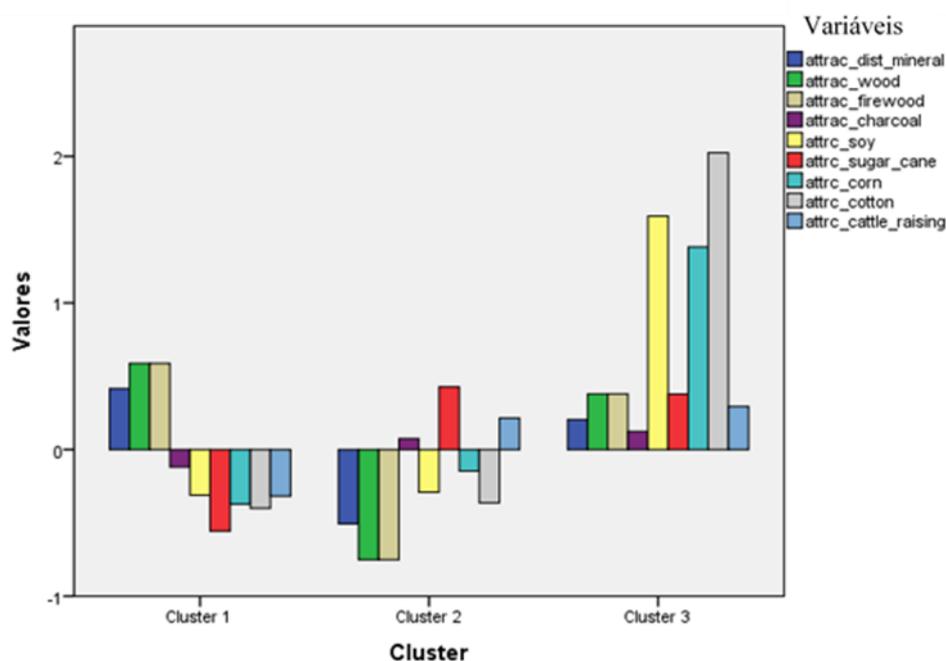


Figura 4.10 - Valores finais de centro dos agrupamento (*clusters*) das variáveis de atratividade econômica.

Fonte: Produção do autor.

A distribuição espacial dos três agrupamentos formados para a categoria é apresentada na Figura 4.11. O Agrupamento 1 está distribuído principalmente nos estados que compõem a região de MATOPIBA e com menor expressão nos estados de Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. Por sua vez, o Agrupamento 2 compreende mormente a porção centro-sul do bioma, nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás Mato Grosso do Sul e Mato Grosso. Frações deste agrupamento também são observadas nos estado que integram a MATOPIBA. O Agrupamento 3 pode ser observado em porções distribuídas nos estados do Centro-Oeste brasileiro, sul do Maranhão, oeste e noroeste de Minas Gerais, além da divisa entre os estados da Bahia, Piauí e Goiás.

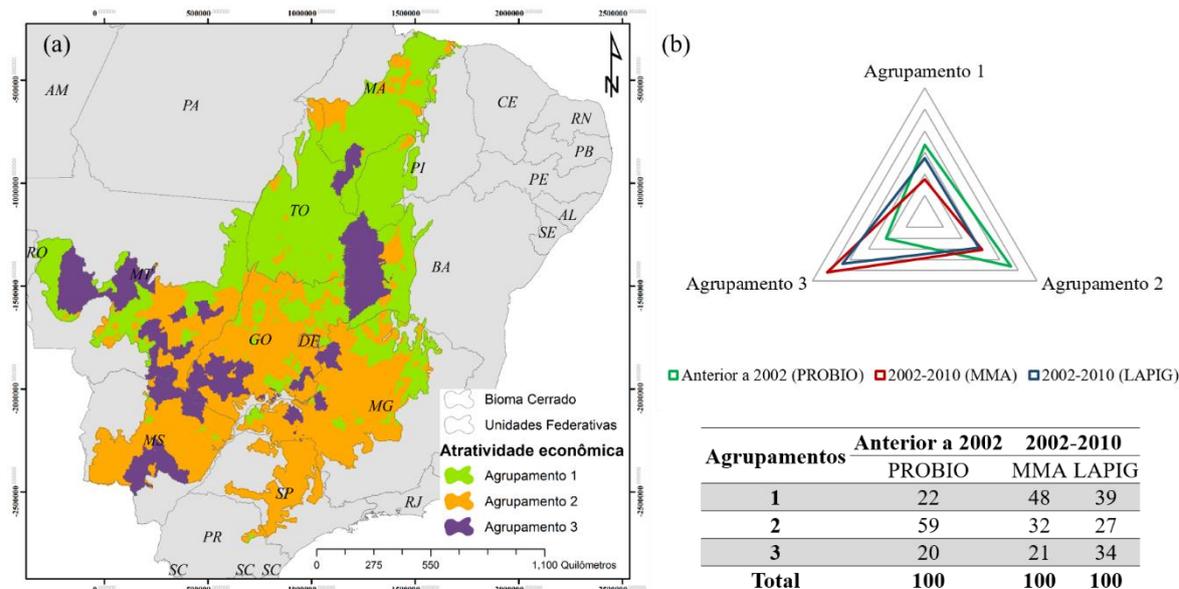


Figura 4.11 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis de atratividade econômica e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).

Fonte: Produção do autor.

Por meio dos resultados obtidos e sua comparação com os dados do PROBIO, mais da metade (59%) das áreas desmatadas até 2002 foram localizadas no Agrupamento 2, 22% no Agrupamento 1 e, 20% no Agrupamento 2. De acordo com os dados elaborados pelo MMA, foi observado que 48% (47.249 km<sup>2</sup>) do total desflorestado no período está localizado na região representada pelo Agrupamento 1, 32% (31.558 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e 21% (20.373 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3. Considerando o desmatamento identificado pelo LAPIG, 39% (15.672 km<sup>2</sup>) estão localizado em áreas relacionadas ao Agrupamento 1, 27% (10.890 km<sup>2</sup>) ao Agrupamento 2 e 34% (13.769 km<sup>2</sup>) ao Agrupamento 3.

Os fatores de atratividade econômica apresentados neste trabalho visam representar a capacidade de atrair investimentos e novas ocupações às diferentes sub-regiões do Cerrado. De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11, até 2002 59% do total desflorestado no bioma foi localizado no Agrupamento 2, cluster que caracteriza áreas com as maiores produções de cana-de-açúcar. Para o período 2002-2010, os dados do MMA e LAPIG indicam a maior concentração destes em áreas do Agrupamento 1, com 48 e 39% do total desmatado, respectivamente. Este agrupamento representa as áreas do bioma que possuem as maiores produções de madeira em tora, lenha e alta proximidade de depósitos minerais. O restante das áreas desmatadas está distribuídas no Agrupamento 3, que

representa as áreas com maior produção agrícola na região, sobretudo algodão, soja e milho.

#### 4.2.2.4.3 Fatores demográficos

Os três agrupamentos formados pelas variáveis demográficas foram divididos da seguinte forma: 34,9% das observações (29.763 células) foram alocadas no Agrupamento 1, 29,7% (25.329 células) no Agrupamento 2 e, 35,5% (30.287 células) no Agrupamento 3.

A participação das variáveis em cada *cluster* é apresentada pela Tabela 4.11. Nela pode ser observado que o primeiro *cluster*, Agrupamento 1, apresenta os maiores valores de densidade populacional (*demo\_dens*) e da porcentagem da população que mora em áreas urbanas (*demo\_tx\_urban*), além dos menores valores da porcentagem da população que mora na zona rural dos municípios (*demo\_tx\_rural*). O Agrupamento 2 por sua vez, apresenta os maiores valores observados de migrantes recentes (*demo\_migr*) e os menores valores de densidade populacional do bioma. Por último, o Agrupamento 3 representa as regiões com os maiores valores da porcentagem da população rural e os menores valores da população urbana e de migrantes recentes.

Tabela 4.11 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores demográficos.

Variável	Centros finais dos <i>clusters</i>		
	1	2	3
<i>demo_dens</i>	0,84	-0,85	-0,12
<i>demo_tx_urban</i>	0,98	-0,01	-0,95
<i>demo_tx_rural</i>	-0,98	0,01	0,95
<i>demo_migr</i>	0,21	0,83	-0,91

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.12 apresenta os valores finais de centro dos agrupamentos (*clusters*).

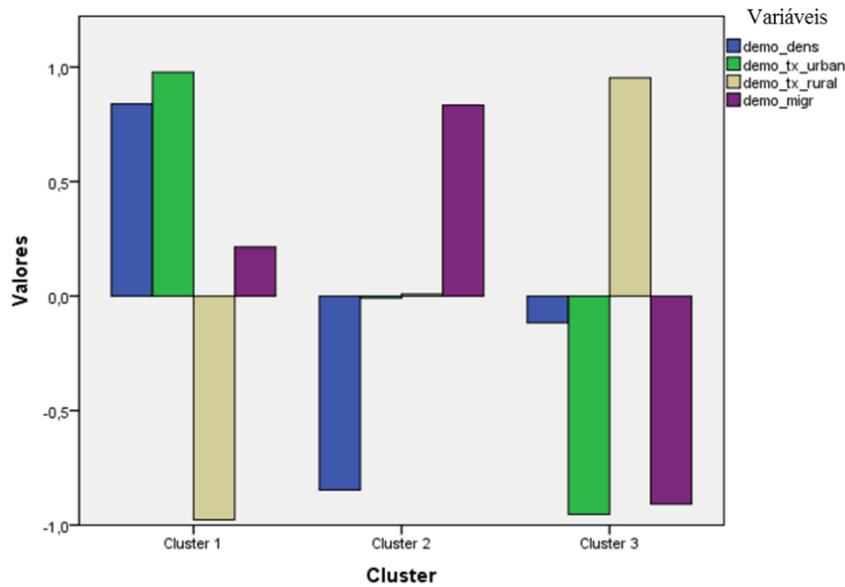


Figura 4.12 - Valores finais de centro dos agrupamento (*clusters*) das variáveis que representam os fatores demográficos.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.13 mostra o ordenamento espacial dos agrupamentos formados pelas variáveis que representam os fatores demográficos. O Agrupamento 1 está distribuído em todo o Cerrado Brasileiro, principalmente na região sul do bioma. O Agrupamento 2 está localizado sobretudo ao longo do Arco do desmatamento, nos estados de Mato Grosso, Goiás, Tocantins e Mato Grosso do Sul. Pequenas porções deste *cluster* são observadas ao longo de todo o Cerrado. O Agrupamento 3 ocupa mormente a região de MATOPIBA e, assim como os demais *clusters*, pode ser observado com menor expressividade em todo o bioma.

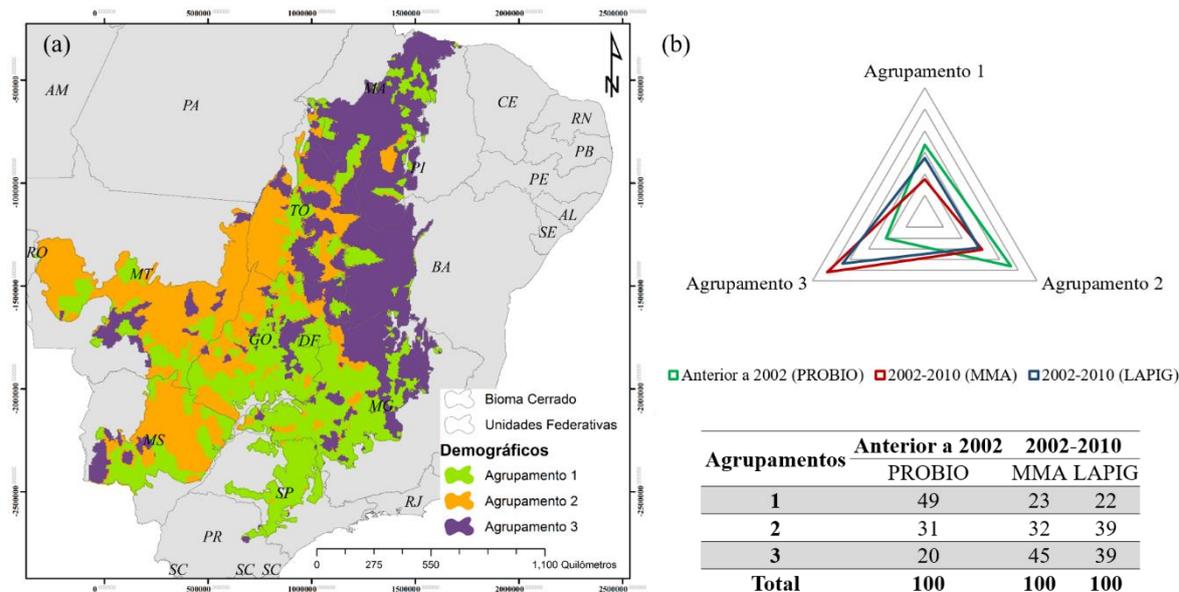


Figura 4.13 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis demográficas e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).

Fonte: Produção do autor.

De acordo com a Figura 4.13b, até o ano de 2002 49% do desmatamento ocorrido no bioma foi localizado no Agrupamento 1, 31 % no 2 e, 20% no Agrupamento 3. Para o período 2002-2010, os dados do MMA mostraram que 45% das áreas desmatadas ocorreram no Agrupamento 3, 32 % no 2 e, 23% no Agrupamento 1. Já de acordo com os dados LAPIG para o mesmo período (2002-2010), 39 % aconteceram no Agrupamento 3, 39% no Agrupamento 2 e, 22% no Agrupamento 1.

Os resultados apresentados pelas Figuras 4.12 e 4.13 mostram o desmatamento ocorrido anteriormente ao ano de 2002 foi localizado principalmente no Agrupamento 1, com 49% do total desflorestado no período. Este cluster está relacionado à áreas com alta densidade demográfica e alto percentual da população localizada na zona urbana dos municípios. Já os novos desmatamentos, ocorridos no período 2002-2010, foram localizados sobretudo no Agrupamento 1, que representam áreas com menor densidade populacional e maior percentual da população ocupando a zona rural dos municípios. De acordo com os dados do MMA e LAPIG para o período, 45 e 39% do total desflorestado se encontra localizado neste agrupamento, respectivamente. As demais áreas foram representadas pelo Agrupamento 2, que concentra as áreas com baixas densidades populacionais e a alta concentração de migrantes.

#### 4.2.2.4.4 Fatores tecnológicos

A categoria das variáveis tecnológicas apresentou 31,1% das observações (26.574 células) retidas no Agrupamento 1, 35% (29.875 células) no Agrupamento 2 e 33,9% (28.930 células) no Agrupamento 3.

Embora composta apenas por duas variáveis, a categoria que representam os fatores tecnológicos observados no Cerrado foi dividida em três *clusters* distintos. A Tabela 4.12 apresenta a contribuição de cada variável para estes agrupamentos. O Agrupamento 1 foi formado pelas células que apresentaram os maiores valores de número médio de tratores por propriedade (*tech\_tractor*) e de porcentagem de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao total de propriedades do município (*tech\_assistance*). O Agrupamento 2 compreendeu regiões com baixos valores de *tech\_tractor* e médios valores de *tech\_assistance*. Em oposição ao Agrupamento 1, o Agrupamento 3 representou áreas com os menores valores das variáveis da categoria.

Tabela 4.12 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores tecnológicos.

Variável	Centros finais dos <i>clusters</i>		
	1	2	3
<i>tech_tractor</i>	1,40	-0,63	-0,63
<i>tech_assistance</i>	0,73	0,37	-1,05

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.14 apresenta os valores finais de centro destes agrupamentos.

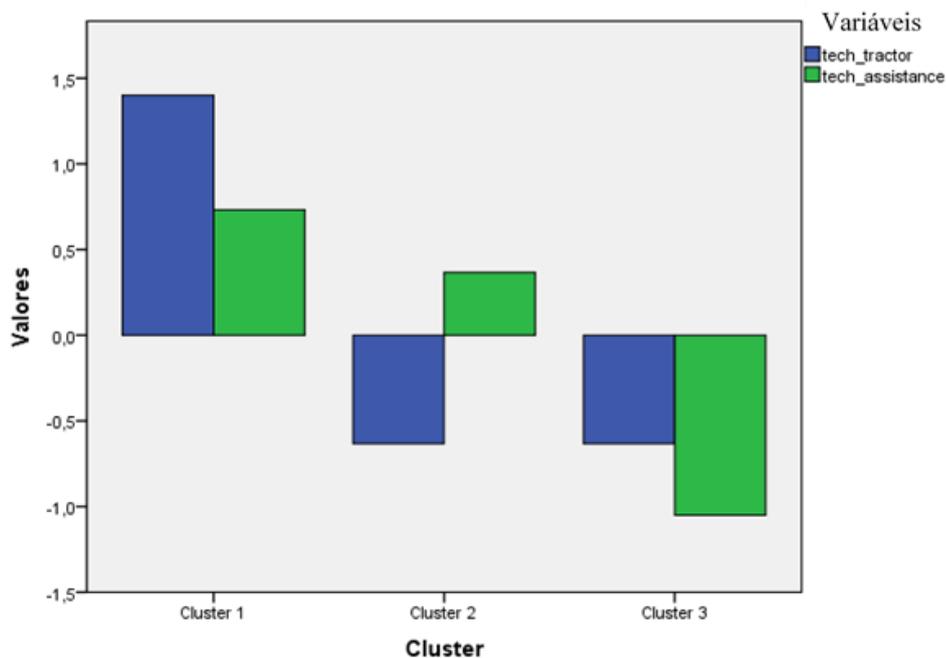


Figura 4.14 - Valores finais de centro dos agrupamento (*clusters*) das variáveis que representam os fatores os fatores tecnológicos.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.15 mostra a organização espacial dos clusters formados com as variáveis que representaram os fatores tecnológicos observados ao longo do Cerrado. Nela pode ser observado que, o Agrupamento 1 ocupa sobretudo as regiões contidas nos estados de São Paulo, no oeste de Minas Gerais, nordeste do Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e sudeste de Mato Grosso. O Agrupamento 2 está espalhado pela região central do Cerrado e em pequenas porções em todos os estados compreendidos pelo bioma. Por fim, o Agrupamento 3 ocupa, principalmente, a região de MATOPIBA.

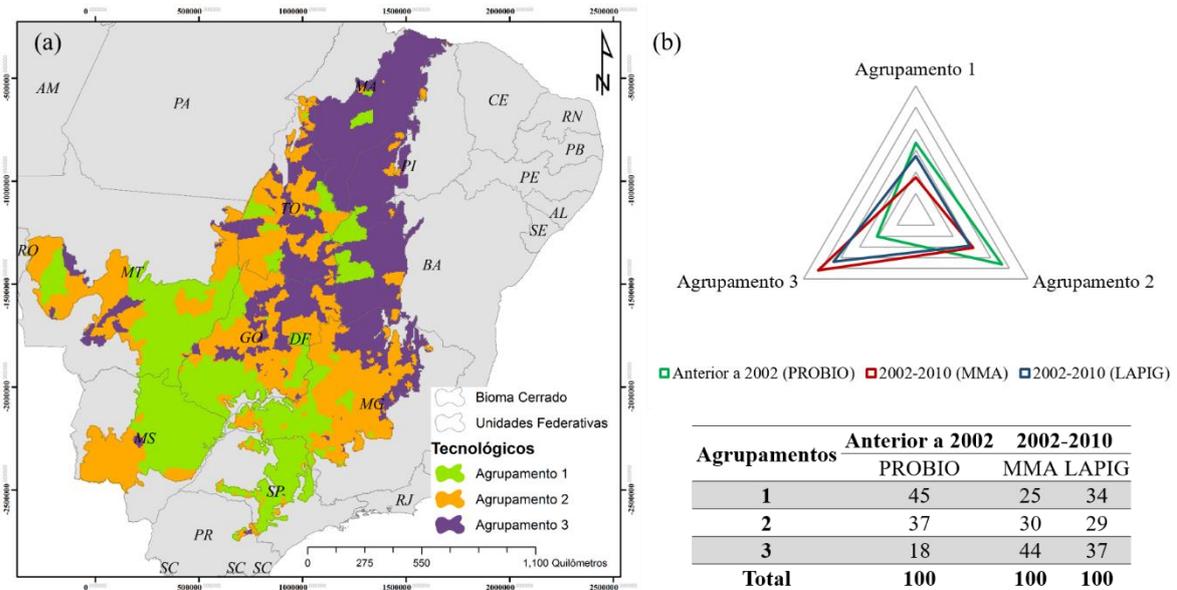


Figura 4.15 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis tecnológicas e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).

Fonte: Produção do autor.

A análise de cruzamento entre os agrupamentos identificados com as variáveis relacionadas aos fatores tecnológicos e o desmatamento mapeado pelo PROBIO até 2002 apontou que 45% do desmatamento ocorreu em áreas do Agrupamento 1, 37% no Agrupamento 2 e, apenas 18% no Agrupamento 3 (Figura 4.15b). Dados do MMA revelaram que 25,27% (25.063 km<sup>2</sup>) do total desmatado no período 2002-2010 estava contido no Agrupamento 1, 30,26% (30.014 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e, 44,47% (44.103 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3. Quando os dados elaborados pelo LAPIG são considerados, foi observado que 34,31% (13.839 km<sup>2</sup>) do total está distribuído no Agrupamento 1, 29% (11.697 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e, 37,68% (14.795 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3. A Figura 4.15b apresenta a contribuição de cada *cluster* no total desflorestado no período 2002-2010, para as duas fontes de dados de desmatamento avaliadas.

Ao considerar os fatores tecnológicos, os resultados mostraram que o maior percentual de áreas desmatadas até 2002 foram localizadas no agrupamento que representa as maiores concentrações de tratores por propriedade e o maior percentual de propriedades que receberam assistência técnica em relação ao total de propriedades do município (Figuras 4.14 e 4.15). Para o período entre 2002 e 2010, tanto os dados do MMA quando os do LAPIG, apontaram que a maior parte dos desmatamentos no período foram localizados no

Agrupamento 3. Este agrupamento reúne áreas com baixo número de tratores e de acesso à assistência técnica, como é o caso da região MATOPIBA.

#### **4.2.2.4.5 Fatores de estrutura agrária**

Analisando os resultados obtidos para o agrupamento das variáveis de estrutura agrária, foi constatado que 26,1% das células (22.262 observações) foram incluídas no Agrupamento 1, 32,9% (28.116 observações) no Agrupamento 2 e, 41% (35.001 observações) no Agrupamento 3.

Os *clusters* formados com as variáveis que representam os fatores de estrutura agrária são apresentados na Tabela 4.13. Por meio da análise dos centros finais é possível afirmar que o Agrupamento 1 representa áreas com os maiores valores de quantidade de pequenas propriedades rurais em relação ao número total de propriedades do município (*agr\_nr\_small*), de porcentagem de grandes propriedades rurais em relação à área total de propriedades do município (*agr\_large*) e de quantidade de propriedades com agricultura familiar (*agr\_nr\_familiar*). O Agrupamento 2 revela áreas com os maiores valores de quantidade de médias e grandes propriedades rurais em relação ao número total de propriedades do município (*agr\_nr\_medium* e *agr\_nr\_large*), de porcentagem de pequenas e médias propriedades rurais em relação à área total de propriedades do município (*agr\_small* e *agr\_medium*), de quantidade de propriedades rurais com agricultura familiar (*agr\_nr\_unfamiliar*), de porcentagem de propriedades com agricultura familiar e não familiar em relação à área total de propriedades do município (*agr\_familiar* e *agr\_unfamiliar*). Finalmente, o Agrupamento 3 apresenta regiões com características intermediárias aos dois primeiros *clusters*.

Tabela 4.13 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores de estrutura agrária.

Variável	Centros finais dos <i>clusters</i>		
	1	2	3
<i>agr_nr_small</i>	1,14	-1,06	0,13
<i>agr_nr_medium</i>	-1,13	1,02	-0,11
<i>agr_nr_large</i>	-1,02	0,95	-0,11
<i>agr_small</i>	-0,91	0,53	0,15
<i>agr_medium</i>	-1,20	1,03	-0,07
<i>agr_large</i>	1,19	-0,93	-0,01
<i>agr_nr_familiar</i>	0,39	-0,48	0,14
<i>agr_nr_unfamiliar</i>	-1,10	0,98	-0,09
<i>agr_familiar</i>	-0,86	0,49	0,16
<i>agr_unfamiliar</i>	-1,07	0,89	-0,04

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.16 apresenta os valores finais de centro destes agrupamentos.

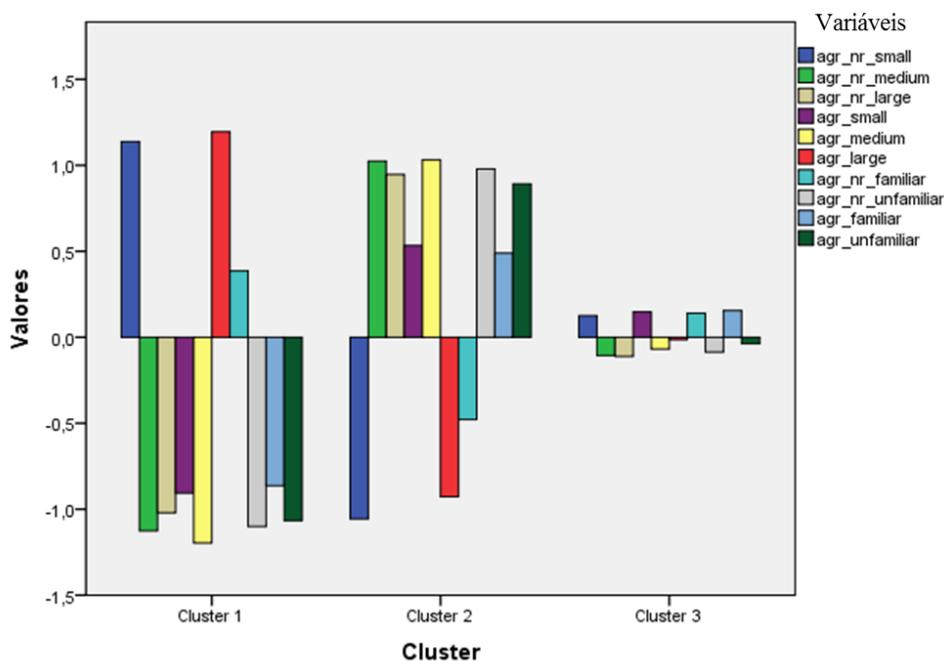


Figura 4.16 - Valores finais de centro dos agrupamento (*clusters*) das variáveis que representam os fatores de estrutura agrária.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.17 apresenta a distribuição espacial dos grupos formados com as variáveis que representam a estrutura agrária observada no Cerrado Brasileiro. A análise dela permite observar que o Agrupamento 1 está espalhado por todo o bioma, o Agrupamento 2

concentrado principalmente nas porções sudoeste e oeste deste e, o Agrupamento 3 está localizado sobretudo na parte central e leste do Cerrado.

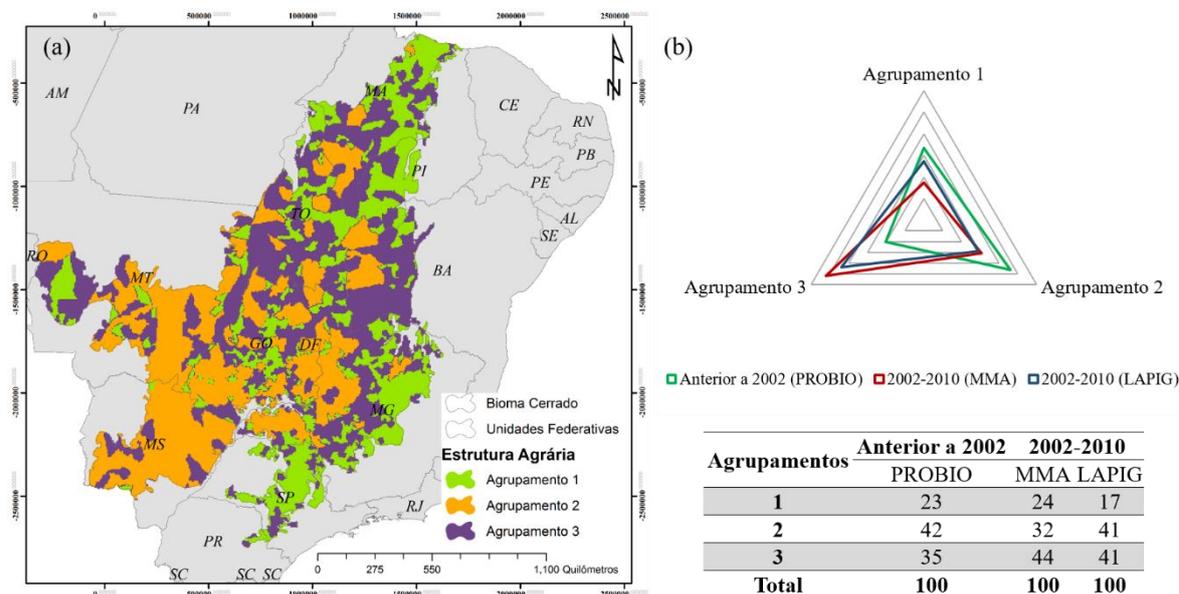


Figura 4.17 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis de estrutura agrária e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).

Fonte: Produção do autor.

Por meio dos resultados obtidos nos agrupamentos de estrutura agrária e sua comparação com os dados do PROBIO, foi observado que 42% do desmatamento ocorreu em áreas do Agrupamento 2, 35% no Agrupamento 3 e, 23% no Agrupamento 1. Já os resultados obtidos com os dados do MMA, foi observado que 24,3% (24.121 km<sup>2</sup>) do total desflorestado no período está localizado na região representada pelo Agrupamento 1, 32,1% (31.836 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 2 e 43,6% (43.222 km<sup>2</sup>) no Agrupamento 3. Considerando o desmatamento identificado pelo LAPIG, 17,4% (7.025 km<sup>2</sup>) estão localizado em áreas relacionadas ao Agrupamento 1, 41,2% (16.608 km<sup>2</sup>) ao Agrupamento 2 e 41,4% (16.698 km<sup>2</sup>) ao Agrupamento 3 (Figuras 4.16 e 4.17).

Com relação à estrutura agrária, 42% dos desmatamentos foram localizados no Agrupamento 2. Este *cluster* abriga áreas com o predomínio de médias e grandes propriedades que não praticam a agricultura familiar. Já o período 2002-2010 foi representado pelo desmatamento sobretudo de áreas que abrigam toda a variedade de tamanho de propriedades (grandes, médias e pequenas) e agricultura familiar e não familiar, correspondentes ao Agrupamento 3. As demais áreas foram localizadas no

Agrupamento 1, que representa elevado número de pequenas propriedades mas com propriedades com grande área em relação à área total de propriedades no município.

#### 4.2.2.4.6 Fatores sociais e econômicos

Por sua vez, a categoria que representou os aspectos sociais e econômicos teve 20,7% do total de células (17.639 observações) incluídas no Agrupamento 1, 40,4% (34.487 observações) no Agrupamento 2 e 38,9% (33.253 observações) no Agrupamento 3.

A Tabela 4.14 apresenta os centros finais dos três agrupamentos formados com as variáveis sociais e econômicas. O Agrupamento 1 retrata regiões com os maiores valores de porcentagem de pessoas com dez anos ou mais alfabetizadas (*soc\_literacy*) e os menores valores porcentagem da população com dez anos ou mais que ganha um salário mínimo, considerando a porcentagem que recebe apenas benefícios do governo (*soc\_renda\_1*) e desconsiderando a porcentagem que recebe apenas benefícios governamentais (*soc\_renda\_2*). O Agrupamento 3 representa áreas com características opostas ao Agrupamento 1. Já o Agrupamento 2 descreve áreas com características intermediárias aos demais *clusters*.

Tabela 4.14 - Centros finais dos agrupamentos das variáveis que representam os fatores sociais e econômicos.

Variável	Centros finais dos <i>clusters</i>		
	1	2	3
<i>soc_literacy</i>	1,28	0,26	-0,94
<i>soc_renda_1</i>	-1,36	-0,25	0,98
<i>soc_renda_2</i>	-1,33	-0,13	0,84

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.18 apresenta os valores finais de centro destes agrupamentos.

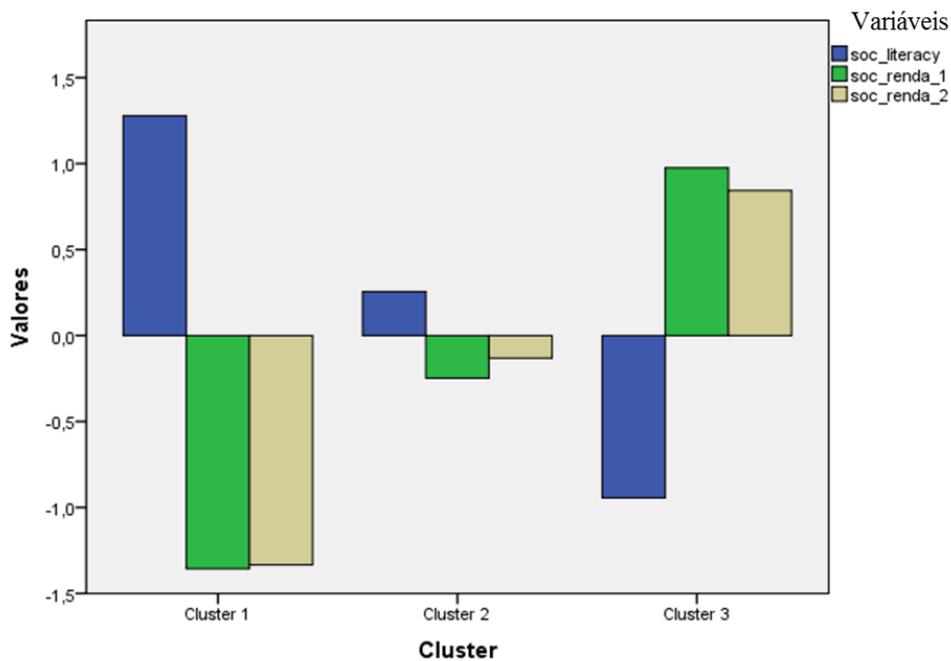


Figura 4.18 - Valores finais de centro dos agrupamento (*clusters*) das variáveis que representam os fatores sociais e econômicos.

Fonte: Produção do autor.

A distribuição espacial dos clusters identificados com as variáveis que representam os fatores sociais e econômicos do Bioma Cerrado é apresentada na Figura 4.19. Nela pode ser observado que o Agrupamento 1 se encontra distribuído sobretudo nas porções oeste, sudoeste e sul do bioma. O Agrupamento 2 está espalhado principalmente na região central do Cerrado e, o Agrupamento 3 principalmente na região de MATOPIBA.

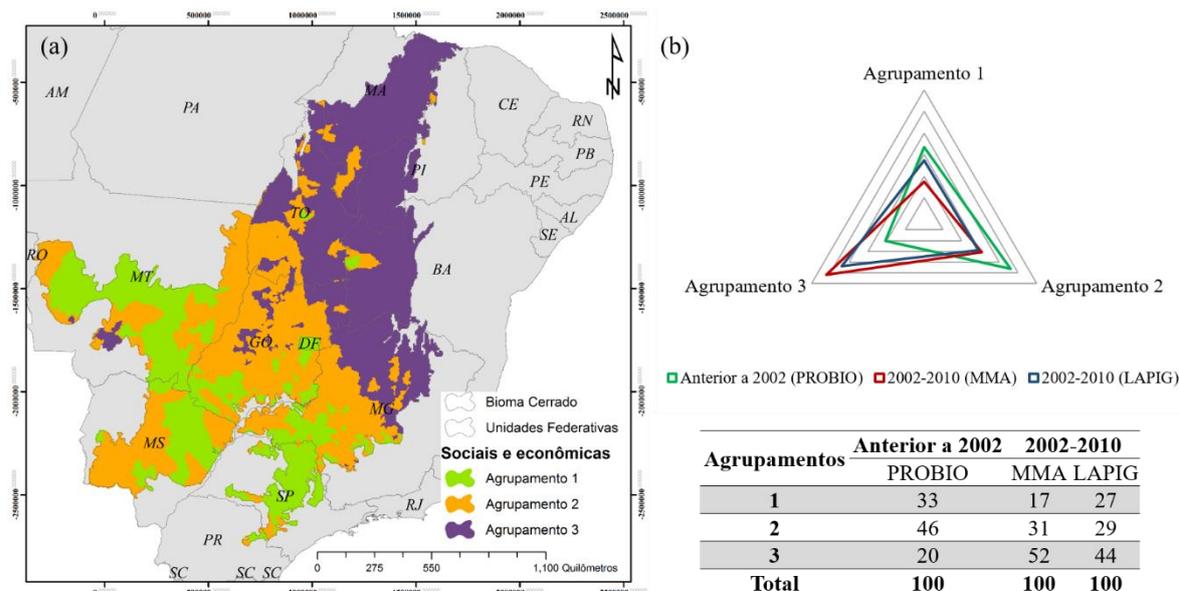


Figura 4.19 - (a) Agrupamentos identificados para o conjunto de variáveis sociais e econômicas e (b) área e porcentagem de cada agrupamento desmatado antes de 2002 (PROBIO) e no período 2002-2010 (MMA e LAPIG).

Fonte: Produção do autor.

Finalmente, os agrupamentos formados pelas variáveis sociais e econômicas foram comparados às áreas de desmatamento identificadas pelo MMA. Desta forma, foi observado que 17,38% (17.240 km<sup>2</sup>) do total desmatado no período esteve localizado na região relacionada ao Agrupamento 1, 30,62% (17.240 km<sup>2</sup>) ao Agrupamento 2 e 52% (17.240 km<sup>2</sup>) ao Agrupamento 3. Ao considerar os dados providos pelo LAPG, foi verificado que 27,3% (11.010 km<sup>2</sup>) das áreas desmatadas estavam distribuídas dentro dos limites do Agrupamento 1, 28,87% (11.643 km<sup>2</sup>) do Agrupamento 2 e, 43,83% (17.678 km<sup>2</sup>) do Agrupamento 3. A contribuição de cada cluster no total desflorestado pode ser observada na Figura 4.19b.

A última característica avaliada foi a que representa os fatores sociais e econômicos observados no Cerrado. Os resultados mostrados pelas Figuras 3.20 e 3.21 indicam que a maior parte (46%) dos desmatamentos ocorrido até 2002 foram localizados em áreas que atualmente apresentam valores médios de alfabetização e renda (Agrupamento 2). Por outro lado, no período entre 2002 e 2010 o desmatamento ocorreu em áreas com as menores taxas de alfabetização e as maiores taxas da população que possui baixa renda do bioma. Os dados de desmatamento mapeados pelo MMA e LAPIG mostram que estas áreas representam 52 e 44% do total desflorestado no período e foram contidas pelo

Agrupamento 3. No mesmo período, as áreas com maiores valores de alfabetização apresentaram as menores taxas de desmatamento (Agrupamento 1).

A Tabela 4.15 sintetiza os valores de participação dos agrupamentos de cada categoria nos desmatamentos observados entre 2002 e 2010 (dados MMA e LAPIG) e atribuiu um nome que descreve sua principal característica com o objetivo de facilitar a interpretação do resultados.

Tabela 4.15 - Contribuição dos agrupamentos nos desmatamentos observados pelos dados do MMA e LAPIG.

Categorias	Agrupamentos	Área (km <sup>2</sup> )		%		Classificação
		MMA	LAPIG	MMA	LAPIG	
Fatores ambientais	1	23123	9624	23,3	23,9	Terras altas e íngremes
	2	52191	18859	52,6	46,8	Terras baixas, planas e com maior cobertura arbórea
	3	23866	11848	24,1	29,4	Terras com altitude médias e úmidas
Fatores de acessibilidade a mercados	1	38487	21351	38,8	52,9	Baixa acessibilidade
	2	21430	5656	21,6	14,0	Alta acessibilidade
	3	39263	13324	39,6	33,0	Média acessibilidade
Fatores de atratividade econômica	1	47249	15672	47,6	38,9	Mineração, madeira e lenha
	2	31558	10890	31,8	27,0	Algodão, soja e milho
	3	20373	13769	20,5	34,1	Cana-de-açúcar, pecuária e carvão vegetal
Fatores demográficos	1	22930	8909	23,1	22,1	População urbana
	2	31415	15598	31,7	38,7	População rural
	3	44835	15824	45,2	39,2	Migrantes
Fatores tecnológicos	1	25063	13839	25,3	34,3	Alta tecnificação
	2	30014	11697	30,3	29,0	Média tecnificação
	3	44103	14795	44,5	36,7	Baixa tecnificação
Fatores de estrutura agrária	1	31836	16608	24,3	17,4	Grande produtor e agricultura não familiar
	2	43222	16698	32,1	41,2	Médio produtor e agricultura familiar e não familiar
	3	99179	40331	43,6	41,4	Pequeno produtor e agricultura familiar
Fatores sociais e econômicos	1	17240	11010	17,4	27,3	População mais alfabetizada e com maior renda
	2	30367	11643	30,6	28,9	População com níveis médios de alfabetização e renda
	3	51573	17678	52,0	43,8	População menos alfabetizada e com menor renda

Fonte: Produção do autor.

## 5 ESTIMATIVAS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR DESMATAMENTO DO CERRADO BRASILEIRO

Este capítulo apresenta os métodos (5.1) e resultados (5.2) das estimativas de emissões de gases do efeito estufa para o Cerrado Brasileiro por desmatamento no período de 1850 a 2010 (com base em dados observados) e de 2011 a 2030 (com base em cenários alternativos de desmatamento).

### 5.1 Métodos

Para estimar as emissões de gases do efeito relacionadas ao desmatamento do Cerrado Brasileiro o arcabouço de modelagem INPE- *Emission Model* (AGUIAR *et al.*, 2012; AGUIAR *et al.*, 2015) foi adaptado para o bioma.

Na parametrização do modelo, foi construído e estruturado um banco de dados multitemporal e espacialmente explícito incluindo camadas de informação de biomassa, formação vegetal e desmatamento. Enquanto o módulo não espacial do modelo foi utilizado para representar o período entre 1850 e 2002, o módulo espacial representou o período entre 2003 e 2015. As informações foram inseridas em uma grade com células regulares de 5 x 5 km<sup>2</sup> no banco de dados, conforme apresentado no Capítulo 3.

Esta Seção está organizada como segue: Seção 5.1.1 apresenta uma visão geral sobre o arcabouço de modelagem INPE-EM; a Seção 5.1.2 descreve a adaptação do modelo para o Cerrado Brasileiro; finalmente, a Seção 5.1.3 detalha as premissas referentes aos cenários de desmatamento.

#### 5.1.1 Visão geral do INPE-EM

O INPE-EM é um modelo de emissão de carbono por desmatamento (AGUIAR *et al.*, 2012) baseado no modelo de contabilidade de carbono proposto por Houghton *et al.* (2000), inicialmente desenvolvido para a Amazônia Brasileira. O arcabouço permite representar o processo de desmatamento utilizando parâmetros espacialmente distribuídos, considerando o efeito das práticas de uso da terra nas emissões de GEE (RAMANKUTTY *et al.*, 2007).

Neste Capítulo, a Versão 2.0 do modelo foi usada para estimar as emissões anuais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para o modelo com dados observados (até 2010) e para

diferentes cenários de desmatamento. A Versão 2.0 (AGUIAR *et al.*, 2015) apresenta diversas melhorias incluindo a incorporação de novos parâmetros para representar diferentes práticas de uso da terra em diferentes regiões e/ou tipos de vegetação (por exemplo, a remoção parcial de raízes), a inclusão do compartimento de carbono relacionado à matéria orgânica morta (madeira e liteira), e estimativas de outros gases além do CO<sub>2</sub> (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO e NO<sub>x</sub>).

O INPE-EM é uma estrutura de modelagem de código aberto organizado em componentes que podem ser parametrizadas e/ou modificados para diferentes contextos geográficos. As análises neste capítulo utilizam principalmente o módulo *ClearCutDeforestation*. O módulo *ClearCutDeforestation* fornece estimativas de emissão de 1ª ordem (assumindo a simplificação que 100% do carbono é liberado no momento da mudança de cobertura do solo) e de 2ª Ordem (que representa o processo temporal de emissão de carbono, combinando a liberação instantânea pelo fogo e a gradual pela decomposição biológica) derivados da remoção total da vegetação natural para converter a área para usos agrícolas. O módulo *SecondaryVegetation*, que representa a dinâmica de crescimento da vegetação secundária, é utilizado em um dos cenários para simular os efeitos da recomposição das reservas legais em termos de absorção de CO<sub>2</sub>.

### **5.1.2 INPE-EM para o Cerrado Brasileiro**

Para estimar a emissão de gases de efeito estufa relacionadas à perda da cobertura natural no Cerrado, o componente *ClearCutDeforestation* foi adaptado para representar no processo de modelagem os diferentes tipos de formação vegetacional presentes no bioma. A heterogeneidade estrutural do Cerrado foi considerada com o objetivo de melhorar a precisão das estimativas. Para isto, as 28 categorias presentes no Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 2004b) foram reagrupadas nos três grupos propostos por Ribeiro e Walter (2008): 1) Formações campestres, 2) Formações savânicas e 3) Formações florestais (Capítulo 3, Figura 3.5). Esta operação resultou em um novo mapa utilizado para distribuir espacialmente a biomassa acima do solo, a razão entre a biomassa abaixo do solo em relação à acima do solo e um conjunto de parâmetros de remoção da vegetação.

Objetivando representar o processo de desmatamento ocorrido no período de 1850 a 2010, os parâmetros dos submodelos de biomassa e remoção da vegetação utilizados no modo não espacial foram ponderados pela porcentagem da área desmatada historicamente (utilizando dados de desmatamento até 2002) de cada formação vegetacional no período.

Estes valores percentuais foram resultantes das análises do Capítulo 4 (Seção 4.1.1). De acordo com os resultados apresentados no Capítulo 4, 13% do total desmatado até 2002 foram de formações campestres, 52% de formações savânicas e 35% de formações florestais.

Nos próximos parágrafos, serão descritos os submodelos de desmatamento, biomassa, remoção da vegetação e vegetação secundária. Adicionalmente, será apresentado o protocolo de exploração dos modelos alternativos para o período de 1985 a 2010.

### **5.1.2.1 Submodelos de desmatamento**

O INPE-EM permite a criação de modelos de emissão em diferentes escalas espaciais e temporais por meio da combinação de um modo espacial e um não espacial (AGUIAR *et al.*, 2012). O “modo espacial” é aplicado para o período no qual é disponível dados espacialmente explícitos de desmatamento real ou projetado. Neste trabalho, o modo espacial foi utilizado para comparar os conjuntos de dados espacialmente explícitos disponíveis (MMA e LAPIG, ver Capítulo 3, Figura 3.3), por meio de dois submodelos. O submodelo D1 (modelo de linha de base) foi construído com os dados de desmatamento elaborados pelo MMA (MMA, 2009; 2011a; b), disponíveis para os períodos de 2002-2008, 2008-2009 e 2009-2010. Para obter valores anuais para o período 2002-2008, o desmatamento total acumulado (79.788 km<sup>2</sup>) foi distribuído igualmente entre os seis anos contidos no intervalo, resultando em uma taxa de 13.298 km<sup>2</sup>·ano<sup>-1</sup>. Para avaliar as incertezas associadas à diferentes fontes de dados de desmatamento, no submodelo D2 foram utilizados os dados anuais elaborados pelo LAPIG (FERREIRA *et al.*, 2007), disponíveis para o período 2003-2015.

Quando a distribuição espacial do desmatamento é desconhecida, o modo não espacial permite contabilizar adequadamente toda a contribuição das conversões históricas de áreas pristinas para as emissões de GEE. No modo não espacial, o INPE-EM opera como se todo o Cerrado estivesse coberto por uma única célula regular (AGUIAR *et al.*, 2012), na qual taxas médias de desmatamento e valores de densidade de biomassa são aplicados, exigindo apenas o conhecimento sobre desmatamento acumulado no período simulado. Neste trabalho, o modo não espacial foi utilizado para estimar a emissão de GEE provenientes do desmatamento para o período entre 1850 e 2002. Para o intervalo, a perda acumulada da vegetação natural até 2002 foi obtida no mapa PROBIO (SANO *et al.*, 2008) e as taxas

médias de desmatamento para todo o bioma foram encontradas na literatura (Tabela 5.7). Os resultados obtidos com as simulações do modo não espacial foram combinados aos obtidos com o modo espacial nos submodelos D1 e D2.

#### **5.1.2.2 Submodelo de Biomassa: biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo e fatores de conversão**

Estimativas precisas de emissão de GEE dependem da disponibilidade de informações espaciais que descrevam a variação da biomassa acima do solo em diferentes tipos de vegetação (MIRANDA *et al.*, 2014). Por sua vez, a variação da biomassa acima do solo está associada à estrutura da vegetação, sazonalidade climática e condições biofísicas (por exemplo, a fertilidade do solo, disponibilidade de água e regimes de fogo) (BUSTAMANTE; OLIVEIRA, 2008). Diferentes fontes de dados forneceram informações espacialmente explícitos na biomassa acima do solo para áreas tropicais, incluindo o Cerrado Brasileiro (SAATCHI *et al.*, 2011; BACCINI *et al.*, 2012). No entanto, estes produtos recentemente elaborados com base em dados de sensoriamento remoto não representam os valores de biomassa original da vegetação (isto é, antes dos distúrbios humanos), essenciais para a avaliação de emissões históricas. Diante disso, este trabalho utilizou duas fontes de dados de biomassa pristina (AGB) para estimar as emissões de GEE. A primeira fonte, espacialmente distribuída, foi o mapa de biomassa desenvolvido para o “Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa” (MCT, 2010a). Neste inventário foram aplicados valores de referência de áreas pristinas para calcular as emissões históricas de mudança de uso da terra. Além do mapa de biomassa, foram utilizadas as informações recolhidas no trabalho de Miranda *et al.* (2014) e de Ward *et al.* (1992), referentes à diferentes tipos de vegetação do Cerrado.

Enquanto as estimativas de biomassa acima do solo de vegetação são relativamente abundantes, as estimativas de biomassa abaixo do solo raramente são o objetivo de estudos sistemáticos. Diferentes estudos de modelagem têm preenchido esta lacuna de informação utilizando uma proporção de biomassa abaixo do solo em relação à biomassa acima do solo, valor que varia consideravelmente entre as fitofisionomias do Cerrado. Em uma recente revisão sistemática, Miranda *et al.* (2014) constatou que a proporção de biomassa abaixo do solo em relação à acima do solo foi, em média, de 2,34 para formações campestres, 1,37 para formações savânicas e 0,22 para formações florestais. Estes valores da relação entre biomassa abaixo e acima do solo (parâmetro *BGBPercAGB*) foram

aplicados ao mapa dos tipos de formação vegetal para verificar o efeito da utilização da informação regionalizada em estimativas de emissão. Esta verificação foi baseada na hipótese que estudos anteriores (LEITE *et al.*, 2012) podem ter subestimado as emissões por meio da aplicação de uma relação baseada em valores para formações florestais para outros tipos de vegetação com o desenvolvimento radicular proeminente (por exemplo, formações campestres).

O INPE-EM quantifica a liberação de cinco diferentes gases de efeito estufa por meio do processo de queima da biomassa, utilizando fatores de conversão da biomassa para cada formação vegetal. Neste trabalho, estes fatores foram baseados no estudo realizado por Ward *et al.* (1992) (Tabela 5.1), para quatro tipos de gases (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO e CO<sub>2</sub>). No entanto, como não foi encontrado valor de fator de conversão específico para os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) foi utilizado o mesmo fator empregado por Aguiar *et al.* (2012) para estimar as emissões para a Amazônia brasileira ( $FactorB\_NOx\_fire = 0,02$ ) (Tabela 5.1).

Outros parâmetros regionalizados relacionados à biomassa foram a percentagem de serapilheira (*LitterPercAGB*) e percentagem de restos de madeira (*DeadWoodPercAGB*). Ambos os percentuais são relativos à biomassa acima do solo (AGB) e foram baseados nos valores apresentados no estudo de Ward *et al.* (1992).

Finalmente, foi utilizada a proporção de 0,5 para conversão de biomassa em carbono ( $FactorB\_C$ ) e a proporção de 1.835 para representar a decomposição de biomassa para dióxido de carbono ( $FactorB\_CO2$ ) com base na Schlesinger (1997) e Edwards *et al.* (1980), respectivamente.

Foi então construído um submodelo de biomassa: B1 (Tabela 5.1). O submodelo B1 expressa de forma espacialmente explícita o parâmetro que representa a quantidade de biomassa acima do solo (AGB), utilizando o mapa de biomassa elaborado para o “Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa” (MCT, 2010a). No modo não espacial, o submodelo B1 apresenta a AGB e demais parâmetros de biomassa como o valor médio dos valores de cada grupo de formação vegetal (MIRANDA *et al.*, 2014), ponderado pela proporção de área desmatada de cada grupo no período 1850-2002 (41,8 Mg.ha<sup>-1</sup>).

Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados no submodelo de biomassa B1, onde C significa “Formação Campestre”. S “Formação Savânica” e F “Formação Florestal”.

Componentes	Parâmetros	Descrição	B1		
			C	S	F
Biomassa	<i>AGB</i> <sup>(a)(b)</sup>	Biomassa acima do solo (Mg/ha)	Especialmente explícita		
	<i>BGBPercAGB</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da biomassa abaixo do solo em relação à AGB	0,70	0,58	0,18
	<i>LitterPercAGB</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da liteira em relação à AGB	0,10	0,26	0,05
	<i>DeadWoodPercAGB</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da madeira morta em relação à AGB	0,00	0,17	0,09
Emissão de biomassa	<i>FactorB_C</i>	Fator de conversão da biomassa para carbono	0,5		
	<i>FactorB_CO2</i>	Fator de conversão da biomassa para dióxido de carbono por decaimento	1,835		
	<i>FactorB_CO2_fire</i> <sup>(a)</sup>	Fator de conversão da biomassa para dióxido de carbono por queima	1,7445	1,7100	1,6081
	<i>FactorB_CH4_fire</i> <sup>(a)</sup>	Fator de conversão da biomassa para metano por queima	0,0014	0,0013	0,0069
	<i>FactorB_N2O_fire</i>	Fator de conversão da biomassa para óxido nitroso por queima	0,0002		
	<i>FactorB_NOx_fire</i> <sup>(a)</sup>	Fator de conversão da biomassa para óxidos de nitrogênio por queima	0,0006	0,0005	0,0008
	<i>FactorB_CO_fire</i> <sup>(a)</sup>	Fator de conversão da biomassa para monóxido de carbono por queima	0,0485	0,0633	0,1133

Fonte: Produção do autor.

### 5.1.2.3 Submodelo de remoção da vegetação: representando o processo de limpeza e corte

A intensidade de desmatamento é heterogênea no espaço e no tempo, dependendo da combinação de sistemas de produção e das condições biofísicas. Atores sociais que trabalham na agricultura fortemente capitalizada possuem recursos para limpar o terreno com eficiência. Por outro lado, o pequeno produtor com propriedades cobertas por uma vegetação densa possui poucos recursos para limpar vastas áreas, remover troncos queimados e raízes. Todos esses fatores influenciam o tempo de decaimento da biomassa e são cruciais para estimar as emissões de 2ª ordem. O INPE-EM inclui vários parâmetros relevantes para descrever este processo. Em primeiro lugar, consideramos que em formações savânicas e florestais uma porcentagem da biomassa é retirada para comercialização antes da queima ( $AGBPercWoodProducts = 0,15$ ). Após esta retirada seletiva, o corte e limpeza da vegetação é realizado e uma porcentagem da biomassa é instantaneamente convertida em gases pelo fogo utilizado para abertura da área ( $AGBPercInstantaneous$ ). Uma porcentagem dos restos de madeira também será imediatamente convertida em gases pela queima ( $DeadWoodPercInstantaneous$ ). O restante da biomassa e restos de madeira morta é deixada como lenha sobre o chão e, gradualmente, vai emitir carbono por decomposição ( $AGBPercDecomposition$  e  $DeadWoodPercDecomposition$ ). Neste trabalho, o processo de liberação de carbono é acelerado pelo uso recorrente de fogo a cada três anos ( $DecompositionFireCyclePeriod = 3$  anos) (REDFORD, 1985; PIVELLO; COUTINHO, 1992; RAMOS-NETO; PIVELLO, 2014). Finalmente, como em Houghton *et al.* (2000), uma pequena porcentagem de carvão decai lentamente, emitindo carbono para a atmosfera ( $DecompositionPercElementalCarbon = 0,02$ ). O teor de carbono presente em cada compartimento (carvão vegetal, madeira comercial, lenha) será liberado conforme diferentes taxas de decaimento (Tabela 5.2).

A informação sobre a velocidade de liberação do carbono para a atmosfera durante o processo de desmatamento é um dos componentes que contribui para a incerteza nas estimativas referente à mudanças de cobertura da terra (AGUIAR *et al.*, 2012). Neste trabalho, três submodelos (VR1, VR2 e VR3) de *ClearCutDeforestation* foram construídos para avaliar esta incerteza. A parametrização dos fatores mencionados acima nos submodelos foi realizada para representar os valores obtidos em literatura científica.

Adicionalmente, valores regionalizados de acordo com a formação vegetacional foram aplicados como a porcentagem da *AGB* que será imediatamente convertida para GEE (*AGBPercInstantaneous*) no momento da remoção da vegetação. O restante da *AGB* será gradualmente decomposto em CO<sub>2</sub> por decaimento (*AGBPercDecomposition*). Da mesma forma, foi regionalizada a porcentagem de resíduos lenhosos que será imediatamente convertida em gases de efeito estufa pela queima (*DeadWoodPercInstantaneous*) e a porcentagem deixada sobre o solo como lenha que será liberada por decaimento (*DeadWoodPercDecomposition*).

Para o submodelo VR1 (modelo de linha de base) a regionalização dos parâmetros *AGBPercInstantaneous*, *AGBPercDecomposition*, *DeadWoodPercInstantaneous* e *DeadWoodPercDecomposition* foi realizada por meio de valores obtidos no estudo de Ward *et al.* (1992). Importante salientar que, devido à ausência de material lenhoso, o parâmetro *AGBPercWoodProducts* foi definido como 0% para formações campestres. Como esperado, a liberação imediata (*AGBPercInstantaneous*) de GEE diminui com o aumento da vegetação lenhosa (Campestre = 0,98, Savânica = 0,66 e Florestal = 0,43). O parâmetro que representa a taxa de decaimento da liteira (*DecayRateLitterDecomposition*) adotou valores baseados nos estudos de Jacobson *et al.* (2011) e Valenti *et al.* (2008), também para as três formações vegetacionais. Para os demais parâmetros, VR foi alimentado com valores individuais.

Nos submodelos VR2 e VR3, valores individuais foram utilizados para todos os parâmetros e testados para verificar a liberação de GEE. No VR2, após a retirada seletiva de 15% da biomassa como produtos madeireiros, 60% da biomassa é liberada imediatamente pela queima da vegetação e, aproximadamente 23% da *AGB* deixada para liberar carbono lentamente por decaimento. No VR3 foi testada uma situação extrema onde 80% da biomassa remanescente após a retirada dos 15% de produtos madeireiros é queimada e liberando imediatamente gases para a atmosfera, no ano do desmatamento. Esta situação foi utilizada para representar grandes proprietários de terras, com recursos para realizar uma rápida limpeza do terreno. Todos os demais parâmetros foram igualmente parametrizados para os três submodelos (Tabela 5.2). As Taxas de decaimento utilizadas foram as mesmas utilizadas por Aguiar *et al.* (2012).

Assim como no submodelo de biomassa, o modo não espacial representou parâmetros como a média dos valores para cada grupo de formação vegetacional (campestre, savânica

e florestal), ponderados pela percentagem de desmatamento destes grupos no período anterior a 2002.

Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados nos submodelos de *ClearCutDeforestation*, onde C significa “Formação Campestre”. S “Formação Savânica” e F “Formação Florestal”.

Componentes	Parâmetros	Descrição	Submodelos				
			VR1*			VR2	VR3
			C	S	F	Todo bioma	Todo bioma
AGB	<i>AGBPercAGB</i>	Porcentagem da biomassa que permanece viva	0			idem	idem
	<i>AGBPercWoodProducts</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da biomassa que se torna produto madeireiro	0	0,15		0,15	0,15
	<i>AGBPercInstantaneous</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da biomassa que irá liberar carbono por queima	0,98	0,66	0,43	0,60	0,08
	<i>AGBPercDecomposition</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da biomassa que irá liberar carbono por decomposição	0,00	0,17	0,41	0,23	0,03
BGB	<i>BGBPercBGB</i>	Porcentagem da biomassa abaixo do solo (BGB) que permanece viva	0			idem	idem
	<i>BGBPercInstantaneous</i>	Porcentagem da BGB que será removida e irá liberar carbono pela queima	0			idem	idem
	<i>BGBPercDecompositionAbove</i>	Porcentagem da BGB que será removida e irá liberar carbono pela decomposição abaixo do solo	0			idem	idem
	<i>BGBPercDecompositionUnder</i>	Percentage of BGB that will be removal and release carbon from below ground decomposition	1			idem	idem
Litter	<i>LitterPercInstantaneous</i>	Porcentagem da liteira que irá liberar carbono por queima	1			idem	idem
	<i>LitterPercDecomposition</i>	Porcentagem da liteira que irá liberar carbono por decomposição	0			idem	idem
Dead Wood	<i>DeadWoodPercInstantaneous</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da madeira morta que irá liberar carbono por queima	0,00	0,33	0,5		0,36
	<i>DeadWoodPercDecomposition</i> <sup>(a)</sup>	Porcentagem da madeira morta que irá liberar carbono por decomposição	0,00	0,67	0,5		0,64
Fire Cycle	<i>DecompositionFireCyclePeriod</i>	Número de anos para queimar os resíduos deixados no solo	3 anos			idem	idem
Elemental Carbon	<i>DecompositionPercElementalCarbon</i>	Porcentagem do carbono que será decomposto muito lentamente em forma de carbono elementar	0,02			idem	idem
Decay rates	<i>DecayRateWoodProducts</i>	Taxa de decaimento dos produtos madeireiros	0,1			idem	idem
	<i>DecayRateElementalCarbon</i>	Taxa de decaimento da biomassa que será decomposta muito lentamente em forma de carbono elementar	0,001			idem	idem
	<i>DecayRateAGBDecomposition</i>	Taxa de decaimento da biomassa acima do solo	0,4			idem	idem
	<i>DecayRateBGBDecompositionAbove</i>	Taxa de decaimento da biomassa abaixo do solo que irá liberar carbono por decomposição acima do solo	0,4			idem	idem

<i>DecayRateBGBDecompositionUnder</i>	Taxa de decaimento da biomassa abaixo do solo que irá liberar carbono por decomposição abaixo do solo	0,7			idem	idem
<i>DecayRateLitterDecomposition</i>	Taxa de decaimento da liteira	0,5	0,39	0,4		0,3519
<i>DecayRateDeadWoodDecomposition</i>	Taxa de decaimento da madeira morta	0,4			idem	idem

<sup>(a)</sup> Parâmetros que variam nos submodelos e \* Submodelo de linha de base.

Fonte: Produção do autor.

#### 5.1.2.4 Explorações do modelo: combinações de submodelos

Para explorar as incertezas associadas ao uso de diferentes conjuntos de dados e parâmetros, foram conduzidas três explorações combinando os diferentes submodelos, para o período 2002-2010. A Tabela 5.3 apresenta estas combinações.

Tabela 5.3 - Protocolo de exploração dos submodelos de desmatamento (D1 e D2), biomassa (B1) e de remoção da vegetação (VR1, VR2 e VR3).

<b>Exploração</b>	<b>Desmatamento</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Remoção da vegetação</b>
Modelo base	D1	B1	VR1
Exploração 1	D1, D2	B1	VR1
Exploração 2	D1	B1	VR1, VR2 and VR3

Fonte: Produção do autor.

Inicialmente foi explorada a incerteza relacionada aos submodelos de desmatamento. Desta forma, a “Exploração 1” compara as estimativas obtidas com as duas fontes de dados de desmatamento D1 (dados MMA) e D2 (dados LAPIG), utilizando os submodelos de biomassa B1 e de remoção da vegetação VR1.

A “Exploração 2” os submodelos alternativos de remoção da vegetação (VR2 e VR3) são comparados ao submodelo de base VR1, combinados com o modelo de desmatamento D1 e de biomassa B1. Esta comparação permite entender o impacto da regionalização dos fatores relacionados à percentagem de *AGB* e *DeadWoodAGB* queimados no primeiro ano, de acordo com a formação vegetacional. Adicionalmente, foi investigado como a intensidade do desmatamento influencia as taxas de emissão comparando VR2 (61% queima no primeiro ano) ao VR3 (80% queima no primeiro ano).

#### 5.1.3 Cenários de emissão de desmatamentos futuros

Além das explorações apresentadas na seção anterior, foram construídos três cenários quantitativos de desmatamento para o Cerrado Brasileiro, sintetizados na Tabela 5.4. O objetivo foi o de avaliar as consequências de trajetórias plausíveis de mudança da cobertura da terra nas próximas décadas, condicionadas por diferentes contextos políticos e econômicos, na emissão de GEE entre 2011 e 2030.

Tabela 5.4 - Premissas para estimativa brutas de emissões de CO<sub>2</sub> por desmatamento nos cenários A, B e C.

Cenário	Denominação	Premissas	Taxa média de desmatamento (km <sup>2</sup> ·ano <sup>-1</sup> ) entre 2011-2030	Referência
A	Excedente CFB máximo (iNDC atual)	350.000 km <sup>2</sup> disponíveis para desmatamento legal após a revisão do CFB serão totalmente convertidas para expansão agrícola nos próximos 35 anos	8.313	Soares-Filho <i>et al.</i> (2014)
B	Intermediário	≈ 80.000 km <sup>2</sup> de vegetação nativa serão desmatados entre 2016 e 2030, seguindo tendências atuais de acordo com dados do LAPIG (D1).	4.000	Ferreira <i>et al.</i> (2007)
C	Excedente CFB controlado (iNDC alternativa)	O desmatamento legal ocorrerá em áreas de excedente do CFB, porém através de ações adicionais de controle será gradualmente reduzido até 2020, a partir daí será permitido apenas a supressão de 800 km <sup>2</sup> ·ano <sup>-1</sup> .		Brasil (2015)

Fonte: Produção do autor.

O primeiro, Cenário A quantifica os impactos potenciais do Código Florestal Brasileiro (CFB) considerando que as terras disponíveis para o desmatamento legal seriam *integralmente* convertidas para expansão agrícola. Para simular o cumprimento do código florestal foram necessárias informações sobre o excedente e déficit da cobertura vegetal natural. Estes valores foram obtidos a partir do trabalho de Soares-Filho *et al.* (2014), que desenvolveu um modelo espacial detalhado para estimar o balanço florestal do Brasil de acordo com a versão mais recente do CFB (BRASIL, 2012). No estudo, Soares-Filho *et al.* (2014) estimam um excedente de 399.000 km<sup>2</sup>. Assumindo uma postura conservadora, foi considerado neste cenário que todo o déficit de vegetação seria compensado e que, aproximadamente 350.000 km<sup>2</sup> de terras agora disponíveis para desmatamento legal no Cerrado seriam desmatadas nos próximos 35 anos. Isso levaria a uma taxa anual de aproximadamente 8.313 km<sup>2</sup>·ano<sup>-1</sup> após 2011 mantendo o nível das taxas médias de 2002-2010, de acordo com os dados do MMA (D1). A espacialização anual da taxa do desmatamento, ilustrada na Figura 5.1.a, foi calculada com base no excedente de cada célula (porcentagem da célula que ainda pode ser desmatada) dividido por 35 anos. Deste modo, neste cenário o desmatamento é heterogeneamente distribuído no espaço (possibilitando estimar as emissões de maneira mais precisa), mas linear no tempo (Figura 5.1.b). O Cenário A é então chamado de "Excedente CFB - máximo".

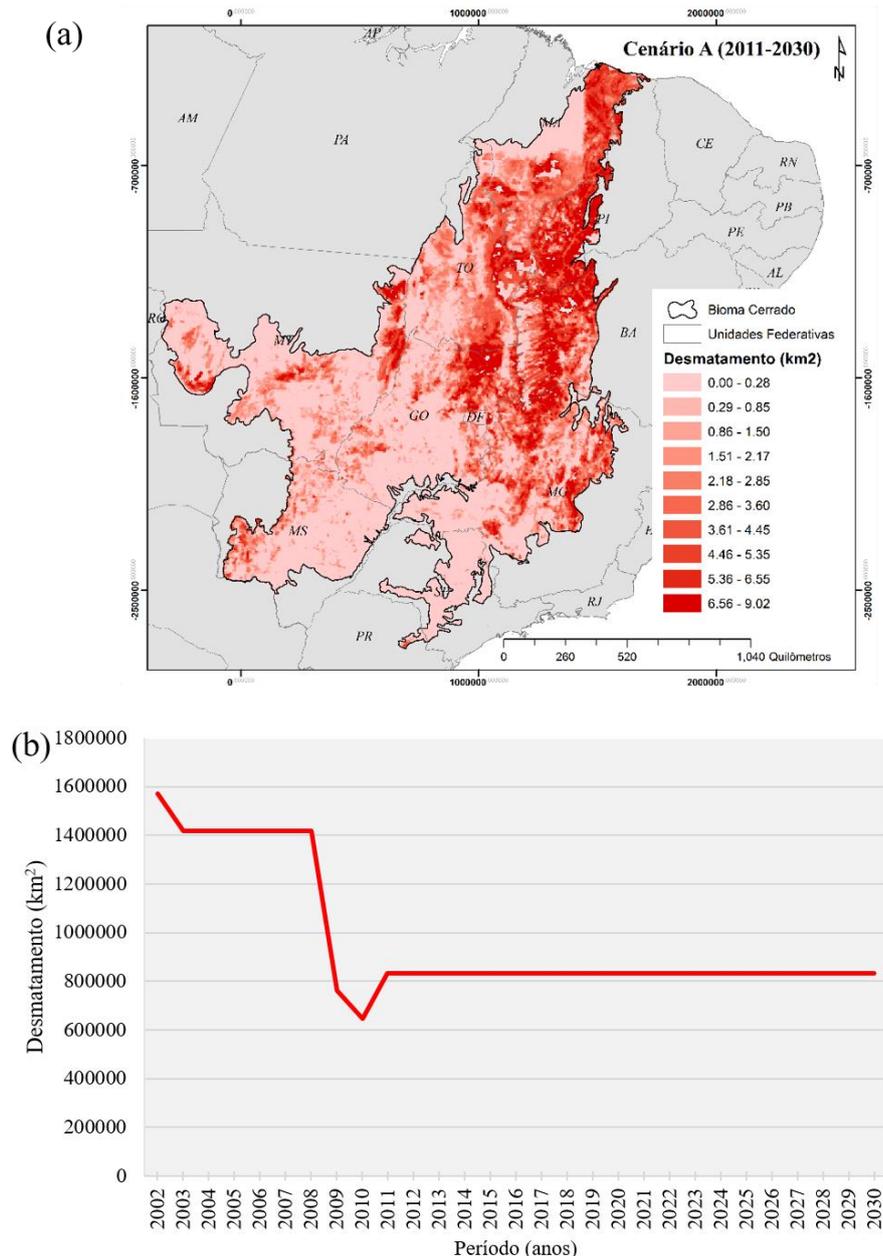


Figura 5.1 - Cenário A: Localização e quantidade de novos desmatamentos (km<sup>2</sup>) estimados com base no excedente florestal (SOARES-FILHO *et al.*, 2014) entre os anos de 2011 e 2030: (a) distribuição espacial da mudança; (b) taxa anual de desmatamento (km<sup>2</sup>) após 2002.

Fonte: Produção do autor.

O segundo cenário, chamado Cenário B, explora os efeitos do cenário de desmatamento simulado por Ferreira *et al.* (2013) para o Cerrado Brasileiro, para o período de 2003-2050. Os dados de desmatamento do LAPIG (D2 nos submodelos apresentados neste Capítulo) foram utilizados como base para projetar taxas futuras de desmatamento. O cenário desenvolvido por Ferreira *et al.* (2013), com base em um modelo de mudança de uso da

terra espacialmente explícito, simulou um aumento de 13,5% nas áreas desflorestadas até 2050, tomando com base o mapa de 2002 elaborado no Projeto PROBIO (SANO *et al.*, 2008). A taxa média simulada entre 2016 e 2050 foi de  $4.000 \text{ km}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$ , distribuída de forma não uniforme no tempo (Figura 5.2). Assim, o Cenário B representa um cenário intermediário.

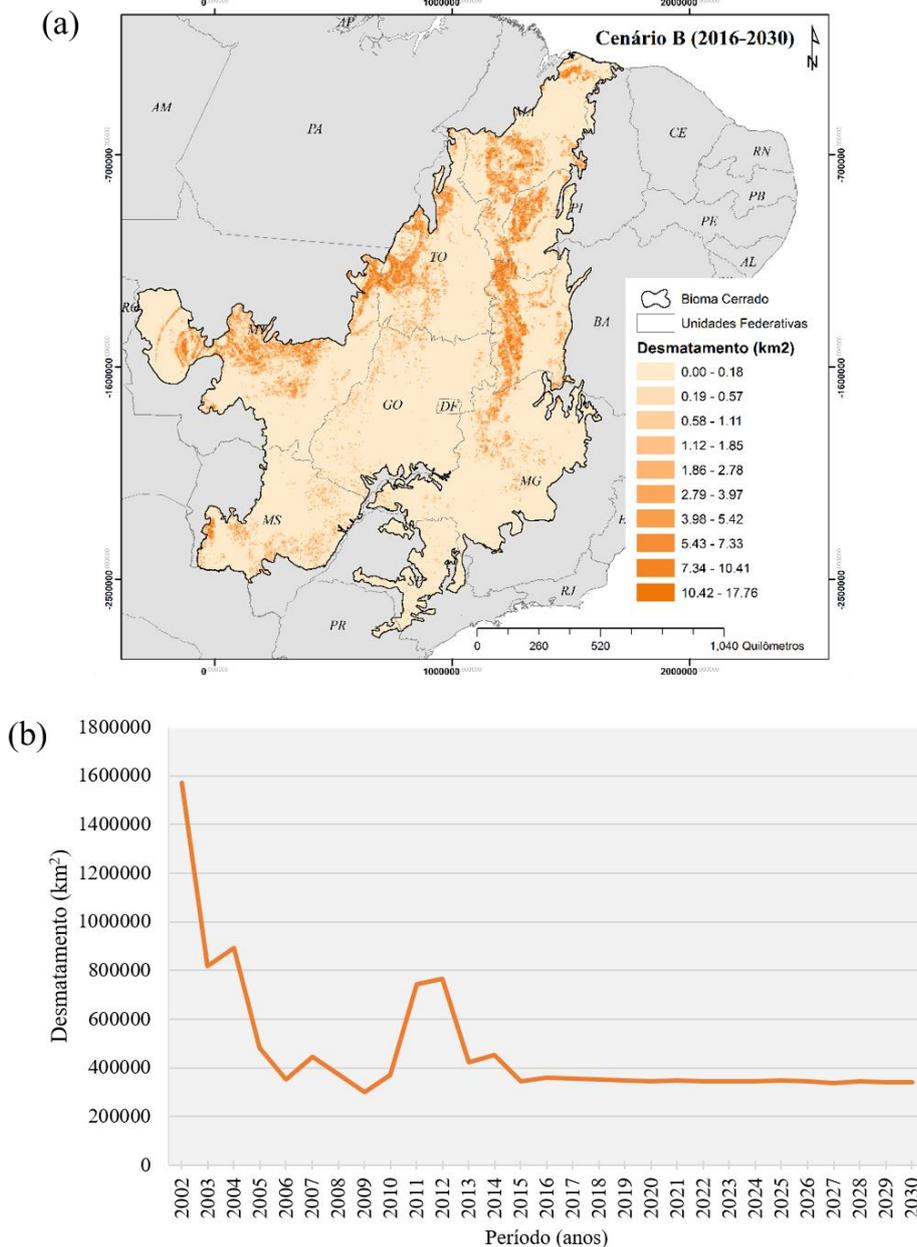


Figura 5.2 - Cenário B: Localização e quantidade de novos desmatamentos (km<sup>2</sup>) simulados por Ferreira *et al.* (2013) (entre os anos de 2011 e 2030: (a) distribuição espacial da mudança; (b) taxa anual de desmatamento (km<sup>2</sup>) após 2002.

Fonte: Produção do autor.

Finalmente, o Cenário C foi concebido como um cenário mais otimista em relação ao demais. A ideia inicial foi a de simular o cumprimento da iNDC Brasileira (Contribuição Nacionalmente Determinada Pretendida) (BRASIL, 2015). O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões anuais para 1,3 GtCO<sub>2e</sub> até 2025 e 1,2 GtCO<sub>2e</sub> até 2030, o que representa a redução de 37% e 43%, respectivamente, em relação à linha de base de 2005 de 2,1 GtCO<sub>2e</sub>. A iNDC não menciona explicitamente como esta redução será distribuída nos setores econômicos, nem se refere explicitamente ao Bioma Cerrado. Se tal redução fosse aplicada igualmente a todos os setores e biomas, o desmatamento anual não deve ultrapassar 8.933 km<sup>2</sup> em 2025 e 8.082 km<sup>2</sup> em 2030 (considerando a taxa de 14.179 km<sup>2</sup> em 2005 estimada pelo MMA). Nesta perspectiva, um cenário baseado na meta da iNDC para o Cerrado seria compatível com o Cenário A, o mais pessimista. Além disso, estes valores são superiores às taxas atuais reportadas pelo recém-lançado TerraClass Cerrado para o ano de 2013 (7.247 km<sup>2</sup>) (MMA, 2015a) e, mais de duas vezes superior aos números reportados pelo sistema SIAD para o ano de 2015 (3.448 km<sup>2</sup>) (FERREIRA *et al.*, 2007). Contudo, sabe-se também que é esperado que as emissões do setor de uso da terra e florestas compensem o crescimento necessário dos setores de energia e transporte no Brasil. Isto posto, neste trabalho serão explorados os efeitos de uma *meta alternativa*, que garantisse efetivamente a proteção do Bioma Cerrado e contribuísse para a redução global de emissões. Para este cenário, consideramos que o desmatamento ocorrerá também somente nas células com excedente de acordo com o CFB (SOARES-FILHO *et al.*, 2014), mas será gradualmente reduzido até 2020 (considerando que a partir deste ano somente 10% do excedente será efetivamente desmatado) estabilizando no patamar de aproximadamente 800 km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup> nos anos seguintes. Neste cenário, representado na Figura 5.3, a premissa é que apenas a supressão relativa às intervenções declaradas oficialmente de utilidade pública e/ou interesse social (por exemplo, expansão urbana, infraestrutura e mineração).

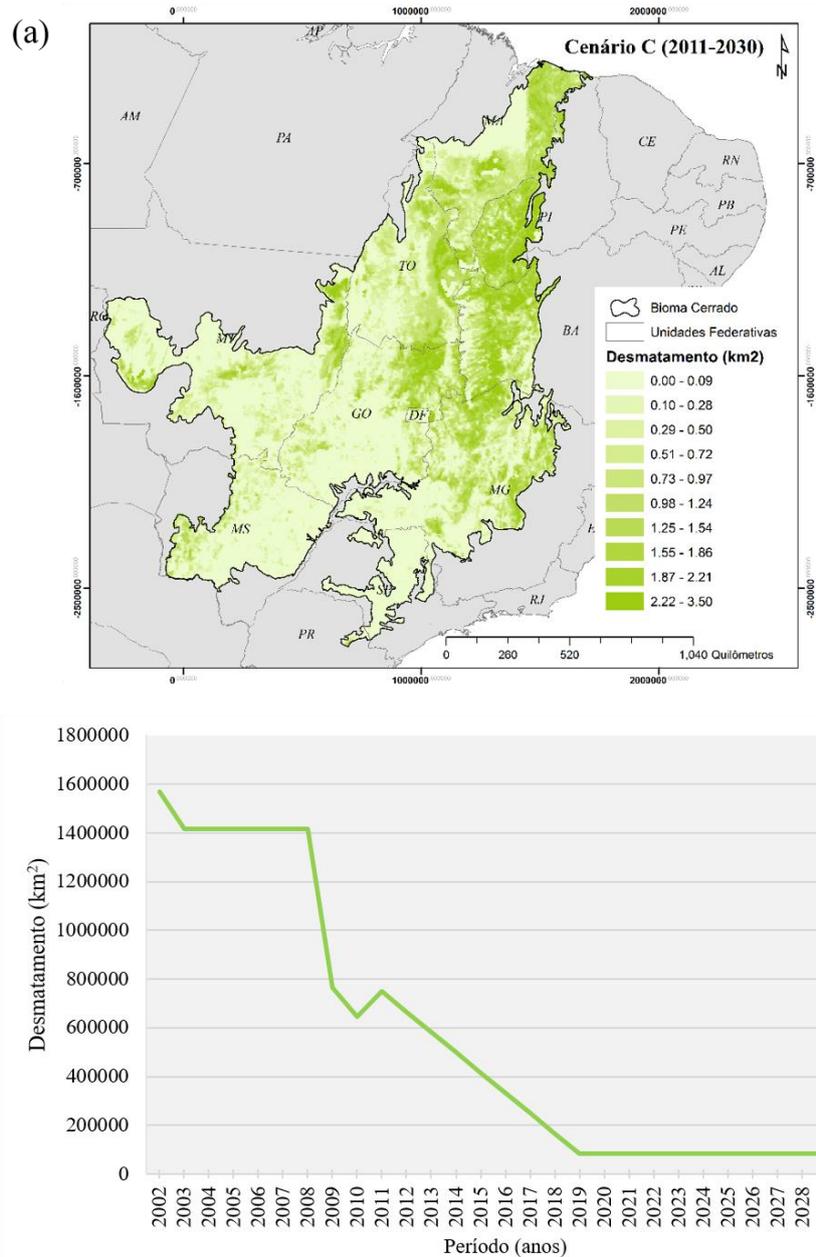


Figura 5.3 - Cenário C: Localização e quantidade de novos desmatamentos (km<sup>2</sup>) estimados com base no excedente florestal (SOARES-FILHO *et al.*, 2014) entre os anos de 2011 e 2030, porém reduzidos a 10% do excedente em 2020: (a) distribuição espacial da mudança; (b) taxa anual de desmatamento (km<sup>2</sup>) após 2002.

Fonte: Produção do autor.

Os cenários de trajetórias do desmatamento propostos nos Cenários A, B e C foram combinados aos submodelos de biomassa (B1) e de remoção da vegetação (VR1), utilizando o modo espacial do INPE-EM BRCerrado para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> de 2002 a 2030.

## Impacto potencial da restauração das reservas legais no balanço de carbono

Finalmente, foi realizada uma análise do potencial de absorção de CO<sub>2</sub> pela regeneração da vegetação natural de acordo com o déficit de Reserva Legal de 46.000 km<sup>2</sup> estimado por Soares-Filho *et al.* (2014) para o Bioma Cerrado. O déficit representa as áreas de Reserva Legal ilegalmente desflorestadas e devem, portanto, ser restauradas (ou compensadas por meio do mecanismo de cotas ambientais, preservando assim parte da vegetação natural remanescente). No cenário analisado, supôs-se que 100% do passivo de Reserva Legal em 2010 seria regularizado gradualmente entre 2015 a 2030 (o CDF estipula um prazo de até 20 anos para regularização). A Figura 5.4 mostra a localização do passivo ambiental de acordo com Soares-Filho *et al.* (2014).

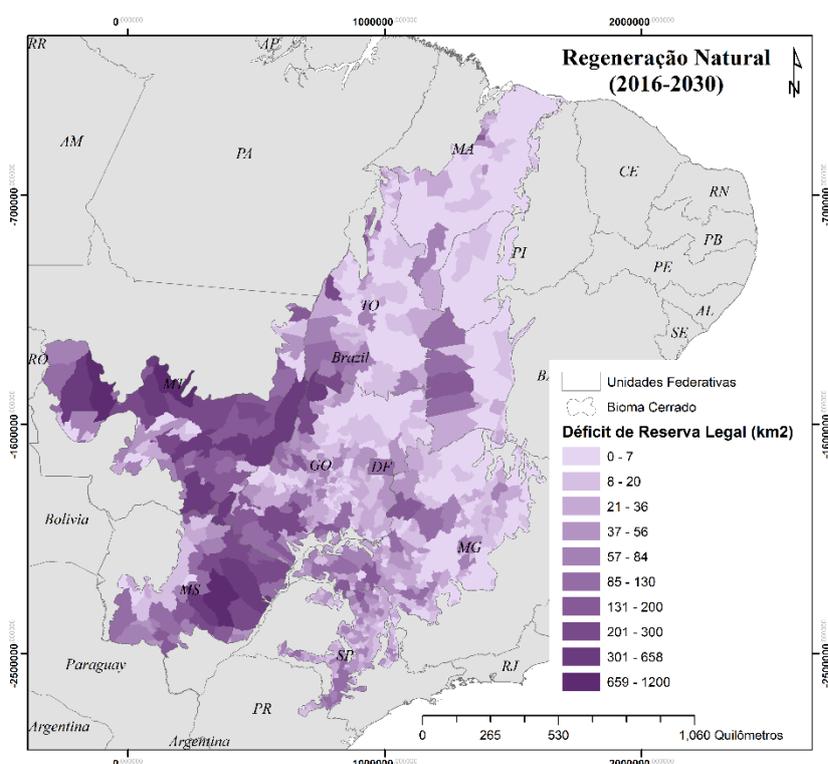


Figura 5.4 - Déficit (km<sup>2</sup>) de Reserva Legal no Bioma Cerrado.

Fonte: Produção do autor.

O componente *SecondaryVegetation* do INPE-EM (AGUIAR *et al.*, 2012; AGUIAR *et al.*, 2015) foi utilizado para estimativa de absorção de CO<sub>2</sub> das áreas a ser regularizadas. O componente estima emissões líquidas decorrentes da dinâmica da vegetação secundária (abandono, crescimento/absorção de C e corte cíclico/emissão de C). Neste trabalho, a suposição é que não haverá corte cíclico após o início do crescimento, já que as áreas serão utilizadas para recomposição das reservas. O período de crescimento para que a biomassa

de cada formação seja recomposta, de acordo com os dados do MCT (2010b) é sintetizada na Tabela 5.5. Estes parâmetros foram utilizados de forma espacialmente explícita para estimativa da absorção de CO<sub>2</sub> até 2030.

Tabela 5.5 - Período de regeneração da biomassa por formação vegetacional.

<b>Formação</b>	<b>Remoção (tC.ano)</b>	<b>Biomassa média</b>	<b>Anos</b>
Campestre	0,52	7,2	14
Savânica	0,59	24,4	41
Florestal	2,37	80,4	34

Fonte: MCT (2010b).

Uma vez estimada a absorção, será possível estimar a emissão líquida nos cenários A, B e C (emissão CO<sub>2</sub> por corte raso - absorção CO<sub>2</sub> por regeneração).

## 5.2 Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados das simulações utilizando o modelo INPE-EM BRCerrado. Em primeiro lugar, são apresentados os resultados das emissões históricas (Seção 5.2.1) para o modelo de linha de base, compondo os modos não espacial (1850-2002) e espacial (2002-2010). A Seção 5.2.2 apresenta os resultados das explorações dos modelos alternativos de desmatamento e remoção da vegetação. Por fim, a Seção 5.2.3 apresenta os resultados dos três cenários de desmatamentos futuros.

### 5.2.1 Emissão de gases de efeito estufa por mudança da cobertura vegetal no período 1850-2002: modelo linha de base

A Tabela 5.4 mostra as estimativas de emissão de segunda ordem de CO<sub>2</sub> para todo o Bioma Cerrado de acordo com as explorações dos submodelos, expressas em GtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup> e PgC·ano<sup>-1</sup>. Para a quantificação do carbono emitido foi considerado o fator de conversão de CO<sub>2</sub> para C de 3,664 (44,01/12,011 em massa equivalente). Considerando o modelo de linha de base (D1B1VR1, descrito nas Tabelas 5.1 e 5.2), entre os anos de 1850 e 2010 as emissões de segunda ordem totalizaram 10,8 GtonCO<sub>2</sub> (2,95 PgC). Deste total, 9,5 GtonCO<sub>2</sub> (2,59 PgC) ou 88% foi emitido antes da disponibilidade de dados espaciais, ou seja, no modo não espacial do modelo (1850-2002). A média anual de emissão estimada para período foi de 62 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>. Entre 2003 e 2010 (Figura 5.5a), anos com disponibilidade de dados espacialmente explícitos e oficiais do governo, as emissões de segunda ordem totalizaram 1,33 GtonCO<sub>2</sub> (0,36 PgC), com média anual de emissão de 165,7 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>. Devido à falta de informação anual, foi aplicado uma taxa constante de desmatamento (14.179 km<sup>2</sup>·ano<sup>-1</sup>) para o período entre 2003 e 2008. Neste período, as emissões de segunda ordem apresentaram um suave aumento de ≈ 4,5%, variando de 171 MtonCO<sub>2</sub> em 2003 para 179 MtonCO<sub>2</sub> em 2008. Entre 2009 e 2010 a queda das emissões acompanha a redução da taxa de desmatamento, de 151 MtonCO<sub>2</sub> para 126 MtonCO<sub>2</sub>.

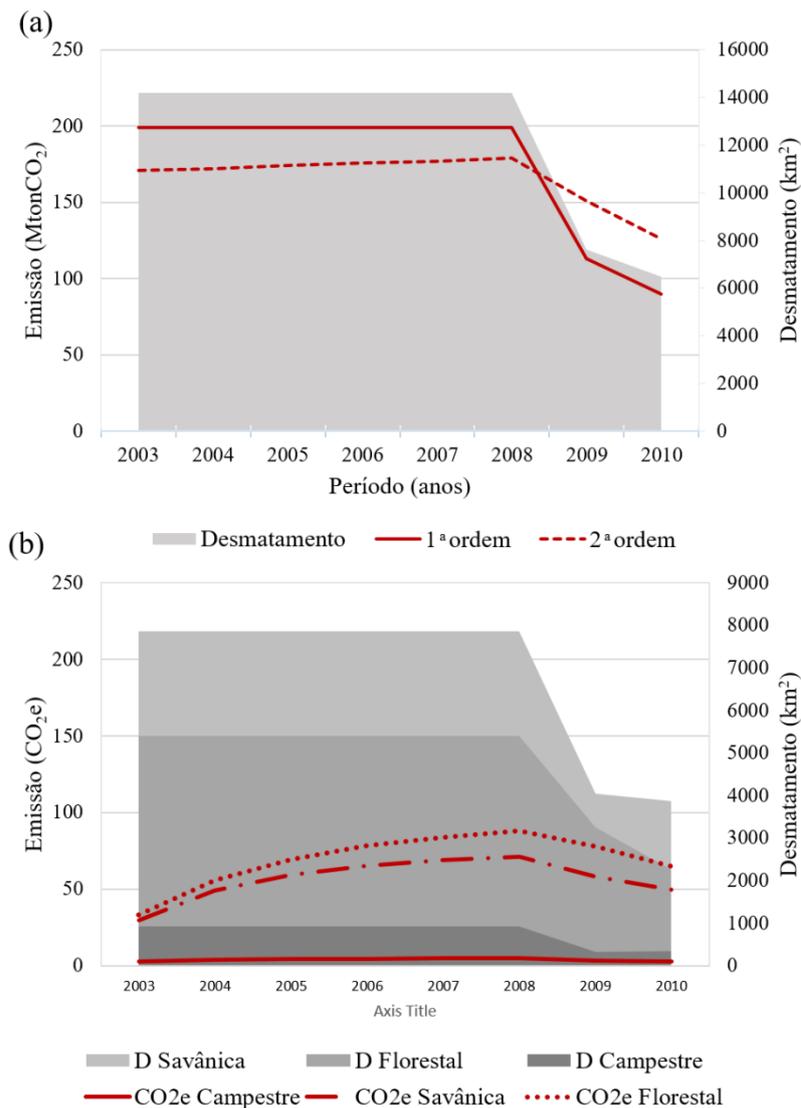


Figura 5.5 - Resultados do modelo (2002-2010): (a) emissões de CO<sub>2</sub> (Mton) (1ª e 2ª ordem) devido à remoção da vegetação no Bioma Cerrado; (b) Emissões anuais de CO<sub>2</sub>e (MtonCO<sub>2</sub>e) entre 2002-2010 e taxas de desmatamento (D) (km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>) distribuídas entre os grupos de formação vegetal. C, S e F correspondem à formações Campestres, Savânicas e Florestais, respectivamente.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.5b mostra a área desmatada e a emissão anual de CO<sub>2</sub>e (CO<sub>2</sub>+ NH<sub>4</sub> + N<sub>2</sub>O) para os três tipos de formação vegetal. Foi observado um aumento das emissões de CO<sub>2</sub>e durante o período 2003-2008, seguido por uma diminuição entre 2009 e 2010, refletindo a redução nas taxas de desmatamento. De acordo com a Tabela 5.5, o desflorestamento de formações florestais foi o responsável pela maior parte das emissões (53%), seguido pelas savânicas (44%) e, finalmente as campestres (3%).

Tabela 5.6 - Estimativa de emissão de CO<sub>2</sub>e para as formações vegetacionais do Cerrado.

Formação vegetacional	CO <sub>2</sub> e (CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub> + N <sub>2</sub> O)									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total	%
Campestre	2,71	3,80	4,35	4,62	4,75	4,82	3,25	2,61	30,91	3
Savânica	29,91	48,88	59,35	65,32	68,87	71,07	58,35	49,63	451,37	44
Florestal	33,40	55,59	69,38	78,21	84,04	88,00	77,88	64,78	551,28	53
<b>Total</b>	<b>66</b>	<b>108</b>	<b>133</b>	<b>148</b>	<b>158</b>	<b>164</b>	<b>139</b>	<b>117</b>	<b>1034</b>	<b>100</b>

Fonte: Produção do autor.

A maioria do desmatamento aconteceu nas formações savânicas (55.049 km<sup>2</sup> ou 55,5%) seguida pelas florestais (37.962 km<sup>2</sup> ou 38,28%) e campestres (6.169 km<sup>2</sup> ou 6,22%), como discutido no Capítulo 4 (Figura 4.4). No entanto, as formações florestais apresentam maior densidade de biomassa e a sua contribuição para as emissões totais foi maior do que a dos outros tipos de formação (53%).

Durante o período 2002-2010, representado no modo espacial do INPE-EM, a emissão de GEE foi especialmente concentrada nas fronteiras agrícolas, em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, mas especialmente na região de MATOPIBA, na porção norte do Cerrado (Figura 5.6). Os quatro estados que compõem MATOPIBA foram responsáveis por 52% das emissões entre 2003 e 2010, totalizando 535 MtonCO<sub>2</sub>e.

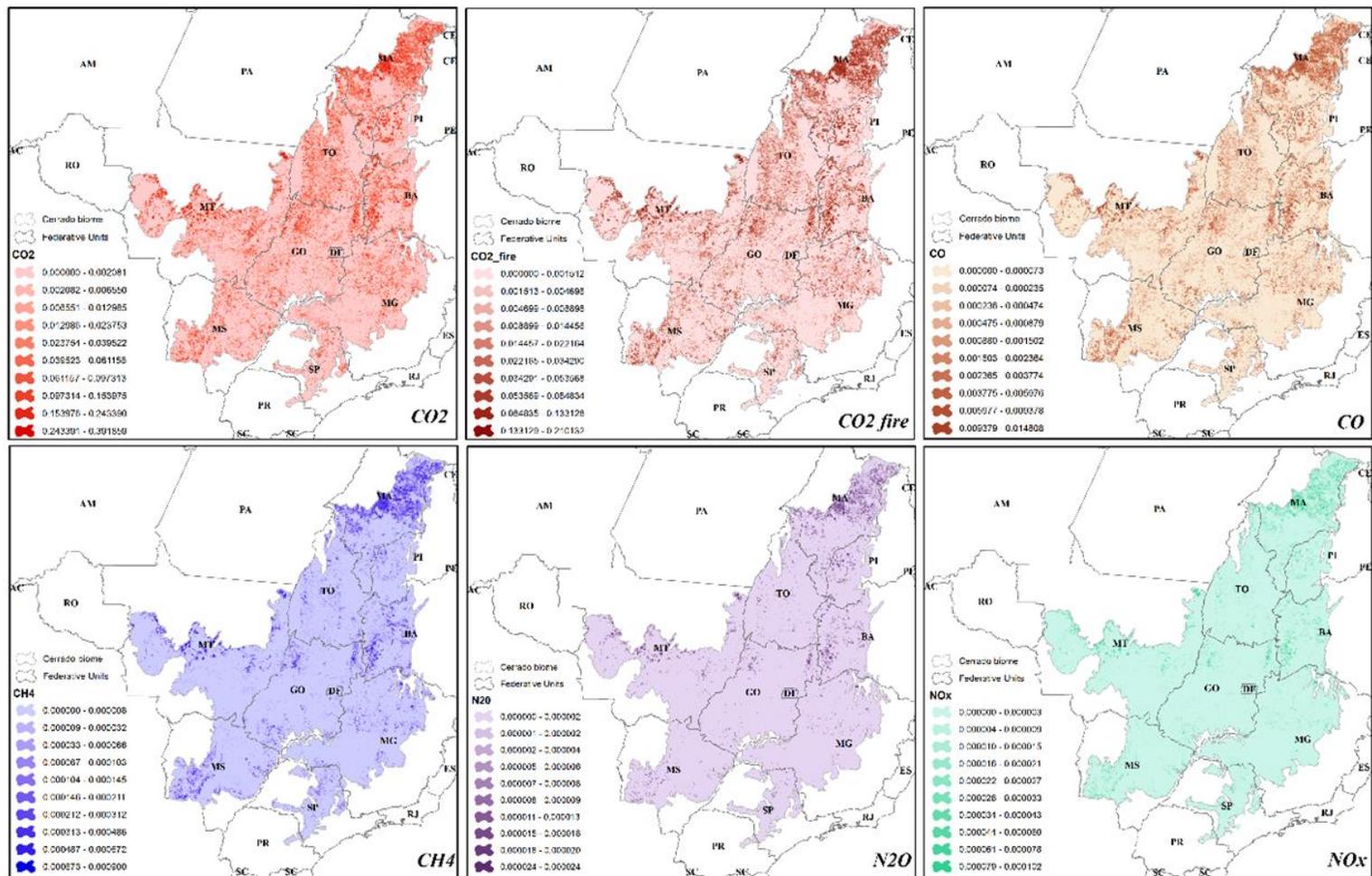


Figura 5.6 - Emissões acumuladas (2002-2010) de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e o percentual do CO<sub>2</sub> imediatamente liberado pela queima da biomassa (CO<sub>2</sub> fire) no Cerrado.

Fonte: Produção do autor.

## 5.2.2 Explorações dos submodelos

Em conformidade com o protocolo de exploração apresentado na Seção 5.1.2, serão apresentados nas subseções seguintes os resultados dos modelos alternativos de emissão para as variações de fonte de dados de desmatamento (Exploração 1) e remoção da vegetação (Exploração 2).

### 5.2.2.1 Resultados dos submodelos de desmatamento

A Figura 5.7 apresenta as estimativas de emissão de CO<sub>2</sub> utilizando os dois conjuntos de dados de desmatamento (D1 e D2). As emissões de primeira ordem baseadas em D1 (MMA, 2009; 2011a; b) acumularam 1,397 GtonCO<sub>2</sub> entre 2003 e 2010, enquanto as baseadas em D2 (LAPIG, FERREIRA *et al.* (2007)) resultaram em 517 MtonCO<sub>2</sub> no mesmo período, o equivalente a 63% de diferença entre os valores. Analisando as emissões de segunda ordem, D1 estimou para o período 1.326 MtonCO<sub>2</sub> e D2 680 MtonCO<sub>2</sub>, diferença de aproximadamente 49%. Considerando as diferenças anuais, a diferença média anual entre as estimativas de primeira ordem foi de 110 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup> (± 40,7) e entre as de segunda ordem de 80,75 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup> (± 29,9).

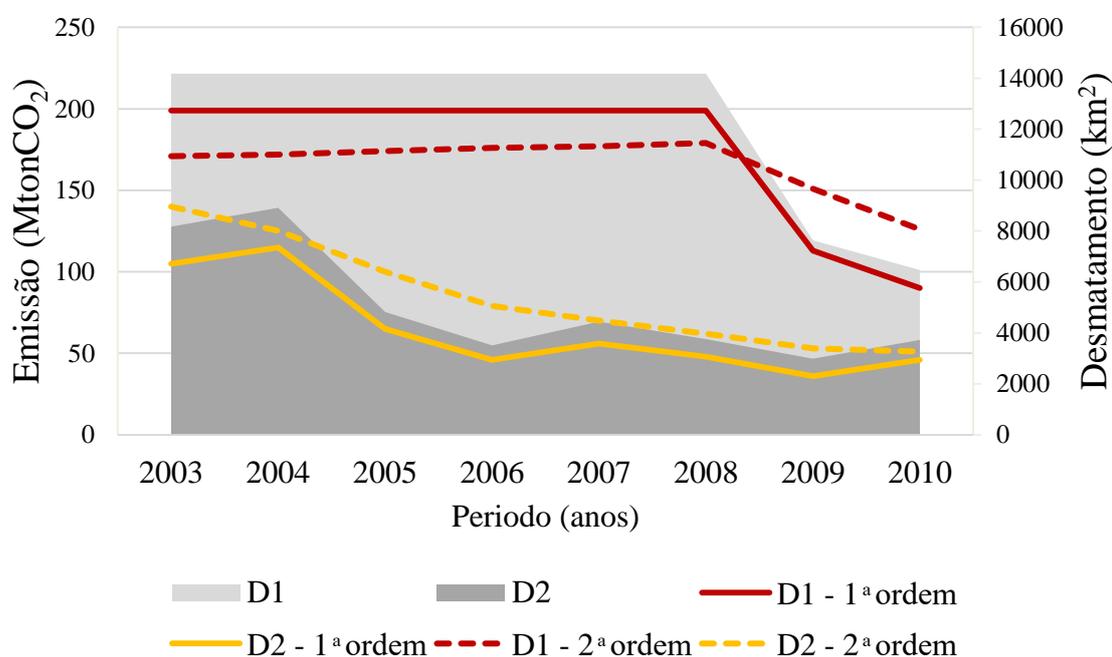


Figura 5.7 - Resultados da Exploração 1 (2002-2010): estimativas de emissão de CO<sub>2</sub> de primeira e segunda ordem (Mton) para o Bioma Cerrado, para dois conjuntos diferentes de desmatamento (km<sup>2</sup>).

Fonte: Produção do autor.

Os dados de desmatamento representaram as maiores incertezas nas estimativas de emissão de CO<sub>2</sub> para o Bioma Cerrado neste trabalho. Entre 2003 e 2010 (período com sobreposição das estimativas de desmatamento do MMA e LAPIG, respectivamente D1 e D2 nas explorações deste estudo), foi observado uma diferença de 48,8% entre as estimativas utilizando os dados do MMA (1.326 MtonCO<sub>2</sub>) e do LAPIG (680 MtonCO<sub>2</sub>). Esta diferença era esperada, uma vez que a área desmatada mapeada pelo MMA (D1) foi cerca de três vezes superior à quantidade detectada pelo LAPIG (D2).

As duas fontes de dados disponíveis (D1 e D2) apresentam séries temporais diferentes (oito e treze anos, respectivamente) e inferiores ao mínimo de duas décadas recomendado por (RAMANKUTTY *et al.*, 2007) para dados de longo prazo. Além disso, D1 - que é o dado utilizado pelo governo federal para definição de políticas públicas - apresenta valores constantes entre os anos de 2003 e 2008, já que o desmatamento foi apurado para o período e não anualmente. Além da escala temporal, D1 e D2 diferem na resolução espacial das imagens utilizadas e nos métodos de detecção das mudanças na cobertura vegetal. Conforme discutido no Capítulo 4, a extração dos desmatamentos em D1 é baseado na interpretação visual de imagens *Landsat* com 30 metros de resolução espacial (MMA, 2009 151; 2011c 152; 2011a 152; 2011b 152), enquanto em D2 é baseado no cálculo e vetorização das mudanças baseados nas variações radiométricas relativas entre as imagens NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) em dados MODIS, com 250 metros a resolução espacial (FERREIRA *et al.*, 2007).

#### **5.2.2.2 Resultados dos submodelos de remoção da vegetação**

A Tabela 5.6 e Figura 5.8 comparam os resultados da Exploração 2, relacionados aos diferentes submodelos de remoção de vegetação (VR1, VR2 e VR3).

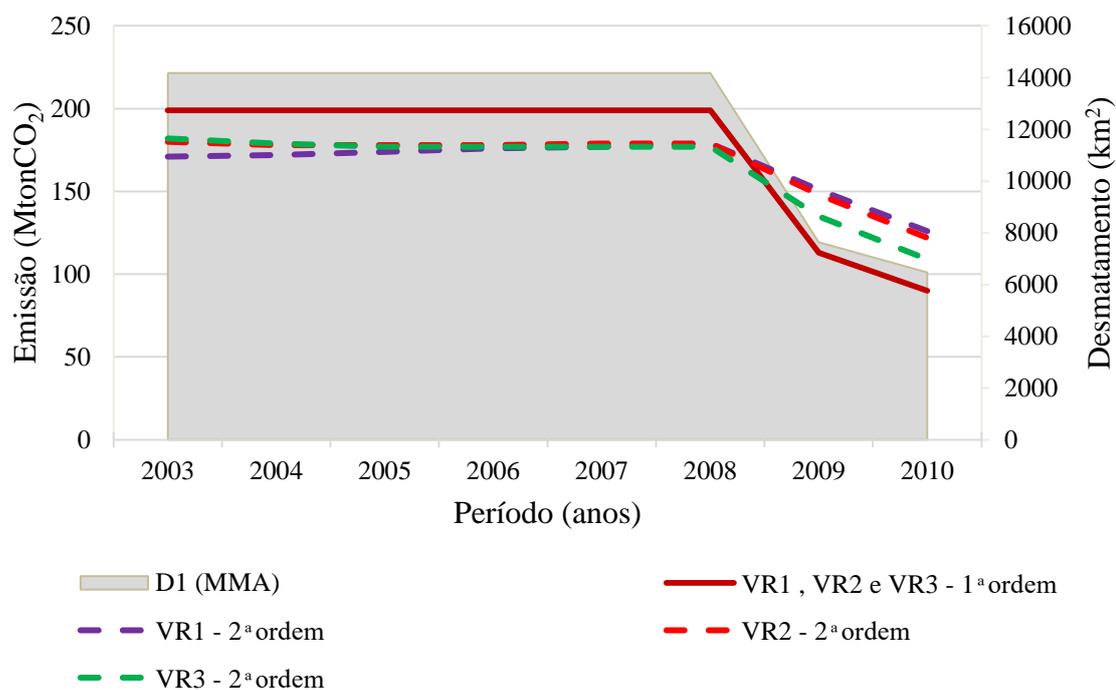


Figura 5.8 - Resultados da Exploração 2 (2002-2010): estimativas de emissão de CO<sub>2</sub> de primeira e segunda ordem (Mton) para o Bioma Cerrado, para três submodelos de remoção da vegetação (VR1, VR2 e VR3).

Fonte: Produção do autor.

Não foi verificada diferença entre as estimativas de emissão de primeira ordem quando comparados os três submodelos que, no período de 2003 a 2010, foi estimada em 1.397 MtonCO<sub>2</sub>. As estimativas de segunda ordem para os submodelos VR1, VR2 e VR3 foram de 1.326 MtonCO<sub>2</sub>, 1.342 MtonCO<sub>2</sub> e 1.313 MtonCO<sub>2</sub>, respectivamente. Como esperado, o submodelo de remoção da vegetação VR3 gerou estimativas superiores em relação aos demais, pois representou que 80% da biomassa que será imediatamente queimada no processo de desmatamento ( $AGBPercInstantaneous = 0,80$ ) enquanto os submodelos VR1 e VR2 representam que 60% serão imediatamente queimada ( $AGBPercInstantaneous = 0,60$ ) liberando carbono e outros gases para a atmosfera.

Tabela 5.7 - Resultados do INPE-EM BRCerrado para o Cerrado Brasileiro: modelo de linha de base e submodelos alternativos de desmatamento (D1 e D2) e de remoção da vegetação (VR1, VR2 e VR3) para o modo não espacial (1850-2002) e espacial (2002-2010).

Modo do modelo	Dados de desmatamento	Período	Desmatamento (km <sup>2</sup> )	Emissões de Segunda Ordem de CO <sub>2</sub>					
				VR1 <sup>(a) (b)</sup>	VR2 <sup>(a)</sup>	VR3 <sup>(a)</sup>	Média <sup>(a)</sup>	GtonCO <sub>2</sub> (média)	Pg C (média)
Não espacial	Literatura científica e mapa PROBIO	1850 - 1987	676323	7336	7336	7335	7336	7.3	2.00
		1988 - 1994	88697	835	835	860	843	0.8	0.23
		1995 - 2002	125616	1308	1308	1311	1309	1.3	0.36
Espacial	D1 (dados MMA)	2003	14179	171	180	182	178	0.2	0.05
		2004	14179	172	178	179	176	0.2	0.05
		2005	14179	174	178	177	176	0.2	0.05
		2006	14179	176	178	177	177	0.2	0.05
		2007	14179	177	179	177	178	0.2	0.05
		2008	14179	179	179	177	178	0.2	0.05
		2009	7637	151	148	135	145	0.1	0.04
		2010	6469	126	122	109	119	0.1	0.03
		<b>Total</b>	<b>989816</b>	<b>10805</b>	<b>10821</b>	<b>10819</b>	<b>10815</b>	<b>10.8</b>	<b>2.95</b>
		Espacial	D2 (dados LAPIG)	2003	8172	140	144	134	139
2004	8913			125	127	121	124	0.1	0.03
2005	4823			100	100	90	97	0.1	0.03
2006	3510			79	78	69	75	0.1	0.02
2007	4443			70	69	64	68	0.1	0.02
2008	3756			62	62	57	60	0.1	0.02
2009	2989			53	52	47	51	0.1	0.01
2010	3725			51	50	47	49	0.0	0.01
2011	7415			66	68	72	69	0.1	0.02
2012	7652			76	77	80	78	0.1	0.02
2013	4234			67	65	61	64	0.1	0.02
2014	4535			61	60	58	60	0.1	0.02
2015	3448	54	54	50	53	0.1	0.01		

---

<b>Total</b>	<b>958251</b>	<b>10483</b>	<b>10485</b>	<b>10456</b>	<b>10475</b>	<b>10.5</b>	<b>2.86</b>
--------------	---------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------

---

<sup>(a)</sup> Valores expressos em Mega toneladas e <sup>(b)</sup> indica o modelo de linha de base.

Fonte: Produção do autor.

### 5.2.3 Cenários de emissão de desmatamentos futuros

Nesta seção são apresentados os resultados das estimativas obtidas para os Cenários A, B e C para o período 2011-2030, sintetizados na Tabela 5.8. A Figura 5.1 apresenta as curvas de emissões no período completo (1850 a 2030).

Tabela 5.8 - Resultados das estimativas de emissões para os Cenários A, B e C.

<b>MtonCO<sub>2</sub>/ano em 2030</b>			
	Emissão	Absorção	Emissão Líquida
Cenário A	96	-20	76
Cenário B	42	-20	22
Cenário C	12	-20	-8
<b>MtonCO<sub>2</sub>/ano (média 2011-2030)</b>			
	Emissão em 2030	Absorção em 2030	Emissão Líquida em 2030
Cenário A	100	-7.6	93
Cenário B	49	-7.6	42
Cenário C	41	-7.6	33
<b>MtonCO<sub>2</sub> (soma 2011-2030)</b>			
	Emissão em 2030	Absorção em 2030	Emissão Líquida em 2030
Cenário A	2005	-152	1853
Cenário B	988	-152	836
Cenário C	815	-152	663

Fonte: Produção do autor.

A liberação potencial de carbono decorrente do desmatamento da área passível de ser desmatada pelo Código Florestal Brasileiro foi simulada pelo Cenário A, de acordo com as premissas da Tabela 5.4. Neste cenário, o desmatamento acumulado entre os anos de 2011 e 2030 poderia atingir 166.265 km<sup>2</sup>, promovendo a liberação de 2 GtonCO<sub>2</sub> (0,55PgC), para a atmosfera. Com emissão média de 100,25 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, este cenário foi o que estimou as maiores taxas de liberação de CO<sub>2</sub>, correspondendo a perdas anuais de 8.313 km<sup>2</sup> de vegetação nativa localizados em propriedades particulares (Figura 5.1). Esta quantidade de carbono representa mais da metade (64%) das estimativas anuais para toda a região pantropical entre 2000 e 2005 (HARRIS *et al.*, 2012).

O Cenário B representou condições intermediárias às do Cenário A e C, baseado no cenário de desmatamento simulado por Ferreira *et al.* (2013). A perda de 79.260 km<sup>2</sup> de cobertura natural no período (2011-2030) resultaria em uma emissão total de 988 MtonCO<sub>2</sub> (0,27 PgC). Anualmente, estes valores correspondem à perda de 3.963 km<sup>2</sup>·ano<sup>-1</sup> e à liberação de 49,4 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>.

O Cenário C estimou a emissão de 815 MtonCO<sub>2</sub> (0,22 PgC) com média anual de 40,75 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, proveniente do processo de desmatamento de 46.554 km<sup>2</sup> (2.328 km<sup>2</sup>·ano<sup>-1</sup>) de vegetação nativa. Este Cenário gerou as menores estimativas de emissão dentre os demais.

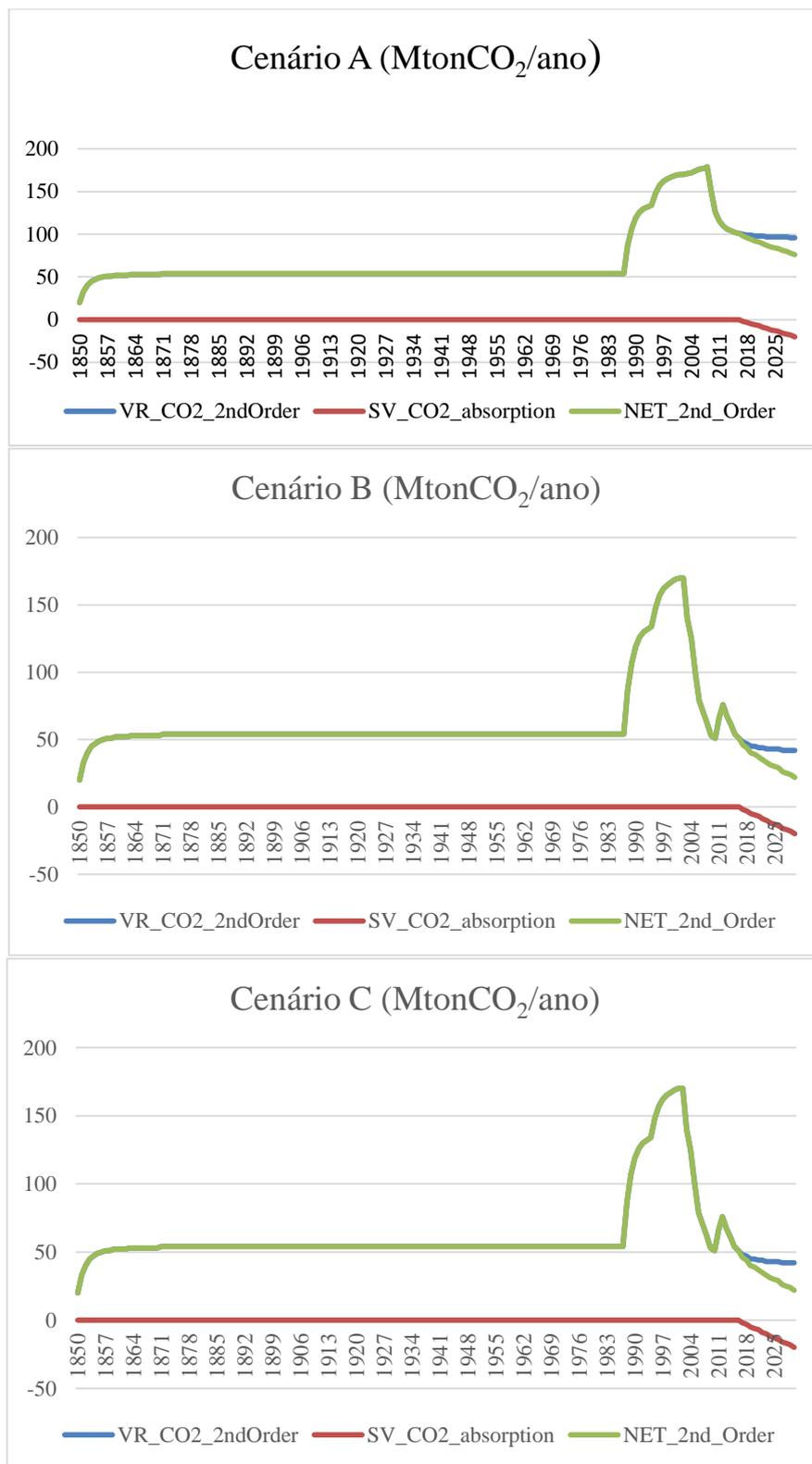


Figura 5.9 - Estimativas de emissões de CO<sub>2</sub> para o período 1850-2010-2030, considerando três cenários alternativos para o período 2011-2030.

Fonte: Produção do autor.

### *Emissões líquidas*

Por fim, foi realizada uma avaliação do potencial de absorção de CO<sub>2</sub> pela regeneração natural, considerando a regularização do déficit de Reserva Legal estimado por Soares-Filho *et al.* (2014). Os resultados mostraram que a recomposição de 100% do passivo de Reserva Legal entre os anos de 2016 e 2030 acarretaria em uma absorção média de MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>. A partir da definição da quantidade absorvida, foi possível quantificar as emissões líquidas dos Cenários A, B e C em 100 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, 49 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup> e 41 MtonCO<sub>2</sub>·ano<sup>-1</sup>, respectivamente, quando considerada a média do período. Quando considerado o ano de 2030, para fins de análise da iNDC, nota-se que somente o Cenário C apresenta balanço negativo, como resultado do controle das taxas de desmatamento adotado como premissa (<800 km<sup>2</sup>/ano), através de ações que vão além das restrições impostas pelo CFB.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo entender como a dinâmica espaço-temporal do processo de desmatamento está relacionada à heterogeneidade intrarregional do Cerrado Brasileiro, a fim de avaliar como determinantes socioeconômicos e biofísicos influenciam estimativas de emissão por desmatamento na região. Para este fim, foi apresentada uma análise dos padrões espaço-temporais do desmatamento no Cerrado visando subsidiar a parametrização do arcabouço genérico de modelagem de emissão de carbono INPE-EM, adaptado para representar a heterogeneidade do Cerrado Brasileiro (INPE-EM BRCerrado). Esta representação se deu por meio da espacialização não só das estimativas de biomassa, como também de diferentes parâmetros do modelo de acordo com três grupos de formação vegetal: campestres, savânicas e florestais. O estudo representou um avanço científico ao apresentar um modelo de emissão de carbono que representa a heterogeneidade biofísica da vegetação do Cerrado Brasileiro, discutindo as incertezas relacionadas aos processos socioeconômicos que afetam as estimativas. Além disso, apresentou uma discussão sobre o efeito de diferentes cenários futuros de desmatamento nas emissões de gases de efeito estufa por desmatamento do bioma.

Esta seção está organizada da forma que segue. A Seção 6.1 sintetiza os resultados obtidos nos Capítulos 4 e 5 e retoma as hipóteses apresentadas no Capítulo 1. A Seção 6.2 apresenta algumas considerações sobre aspectos metodológicos desta tese. A Seção 6.3 coleta os resultados mais relevantes apresentados nos Capítulos 4 e 5 em termos de subsídios para políticas públicas para o Cerrado, e os discute com maior detalhe. Por fim, a Seção 6.4 apresenta sugestões para trabalhos de pesquisa futuros, com base nos resultados e conclusões desta tese.

### 6.1 Síntese dos resultados e hipóteses de pesquisas

#### *Análise dos padrões de desmatamento*

Os resultados da análise dos padrões de desmatamento permitiram observar duas frentes de expansão agropecuária ainda em atividade no Cerrado Brasileiro. A primeira frente compreende o sudeste de Mato Grosso e leste de Mato Grosso do Sul. A segunda compreende o nordeste de Minas Gerais se estende ao oeste da Bahia, Piauí, Tocantins e sul do Maranhão (MATOPIBA). Jordan *et al.* (2015) mencionaram o MATOPIBA como um dos *hotspots* de mudanças do uso da terra na América Latina. Nesta região, a cobertura

natural dá lugar à expansão das lavouras de soja e outras culturas anuais (SPERA *et al.*, 2016). Rocha *et al.* (2011) identificaram as mesmas frentes de expansão para o período entre 2002 e 2009. Os autores concluíram que o desmatamento ocorrido no Mato Grosso, oeste da Bahia e sudeste de Goiás estão relacionados à expansão da agricultura, enquanto o desmatamento na porção nordeste de Goiás está associado à produção de carvão vegetal, mineração e pecuária (ROCHA *et al.*, 2011), o que foi confirmado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011c). Aproximadamente 70% dos eventos de desmatamento estão concentrados em apenas 100 municípios, ocorrendo sobretudo em áreas de vegetação densa, adequadas para a agricultura mecanizada e, em menor grau à pecuária extensiva (ROCHA *et al.*, 2011). Diferentemente ao observado na Amazônia e em outras regiões tropicais, as taxas de desmatamento não estão dissociadas da expansão agrícola (MACEDO *et al.*, 2012; GOLLNOW; LAKES, 2014). No Bioma Cerrado, a expansão da agricultura ainda está associada à conversão de áreas de vegetação nativa (LAPOLA *et al.*, 2014).

A distribuição espacial do desmatamento foi analisada em relação às formações vegetacionais presentes no Cerrado, para os dois períodos representados no INPE-EM: anterior a 2002 (modo não espacial) e 2002-2010 (modo espacial). Os resultados mostraram que o desmatamento apresentou padrão de distribuição espacial diferentes nestes dois períodos. No primeiro (anterior a 2002), foi observado o predomínio do desmatamento de formações campestres (54,5%) em relação às formações savânicas (41,38%) e florestais (44,16%). Já no segundo período (2002-2010), a formação que registrou maior perda de sua vegetação natural original foi a savânica, 56% segundo dados de desmatamento mapeados pelo MMA (MMA, 2009; 2011a; b) e 62% segundo dados mapeados pelo LAPIG (FERREIRA *et al.*, 2007). Os dados do MMA evidenciaram um aumento do desmatamento das formações florestais no período 2002-2010 (38%) em relação ao anterior a 2002 (30%). O reconhecimento dos padrões do desmatamento acima descritos permitiu parametrizar o modo não espacial (anterior a 2002) do INPE-EM (AGUIAR *et al.*, 2012) para representar o processo de desmatamento ocorrido no bioma no período.

#### *Análise do desmatamento em sub-regiões no Cerrado*

- Adicionalmente, foi aplicada a técnica de Análise de Agrupamentos com o objetivo de reconhecer no Bioma Cerrado sub-regiões homogêneas em relação à

características ambientais e socioeconômicas. Após esta análise, foi feito o cruzamento dos dados de desmatamento por sub-região (agrupamento ou *cluster*), visando investigar os determinantes dos caminhos do carbono na região. Da mesma forma que a análise dos padrões de desmatamento, este cruzamento de informações também considerou os dois períodos previstos no INPE-EM, anterior a 2002 (modo não espacial) e 2002-2010 (espacial). Ao comparar as características do desmatamento ocorrido até 2002 (dados PROBIO) e entre 2002 e 2010 (MMA), foi possível identificar que os determinantes dos caminhos do carbono no Cerrado mudaram em menos de duas décadas. Em relação aos aspectos ambientais, os resultados mostraram que o *desmatamento histórico até 2002* foi distribuído predominantemente (51%) em áreas com alta umidade média do solo, médias altitudes e com baixa cobertura arbórea. Ao considerar os aspectos socioeconômicos foi verificado que a maior concentração de áreas desmatadas neste período está distribuídas em regiões com alta e média acessibilidade a mercados (39%), que possuem as maiores produções de cana-de-açúcar (59%), apresentam alta densidade demográfica e alto percentual da população localizada na zona urbana dos municípios (45%), com as maiores concentrações de tratores por propriedade rural e o maior percentual de propriedades rurais que receberam assistência técnica (45%), áreas com o predomínio de médias e grandes propriedades que não praticam a agricultura familiar (42%), em áreas que apresentam valores médios de alfabetização e renda (46%).

- *Entre 2002 e 2010*, a maior parte do desmatamento mapeado ocorreu em áreas com baixas altitudes, topografia plana e com a maior cobertura arbórea do Cerrado (53% do total do MMA e 47% do LAPIG). Em relação aos fatores socioeconômicos, as áreas desmatadas mapeadas pelo MMA foram distribuídas sobretudo em regiões com valores médios de acessibilidade (39,6%), próximas a depósitos minerais e com as maiores produções de madeira em tora e lenha (47,6%), maior porcentagem de migrantes (45,2%), baixa tecnificação (44,5), com predomínio de pequenas propriedades e agricultura familiar (43,6%) e com a população menos alfabetizada e com menor renda do bioma (52%).

As diferenças nos fatores biofísicos e socioeconômicos entre os dois períodos (antes de 2002 e 2002-2010) refletem a existência de novas frentes de expansão agrícola, em especial no MATOPIBA, onde se concentra a maior parte do desmatamento recente.

*Estimativas de emissões: Modelo de linha de base*

De acordo com os resultados, as emissões de 2ª ordem provenientes do desmatamento do Cerrado Brasileiro entre 1850 e 2010 foram estimadas em 10,8 GtonCO<sub>2</sub> (2,95 PgC) ou, em termos de carbono equivalente, de 11,04 GtonCO<sub>2e</sub> (3,01 PgC). Considerando apenas o período espacial (2002-2010), a emissão estimada foi de 1,32 GtonCO<sub>2</sub> (0,36 PgC) ou 1,36 GtonCO<sub>2e</sub> (0,37 PgC). Deste total, a conversão de áreas recobertas por formações florestais foram as principais contribuintes para o total de GEE emitido no período, seguidas pelas savânicas e campestres. Entretanto, a vegetação que mais perdeu área no período foi a Savânica 55,5%, seguida pela Florestal com 38,28% e, por fim, as campestres com 6,22% da área total convertida. Considerando a distribuição espacial das emissões de CO<sub>2e</sub> acumuladas entre 2003 e 2010, nosso estudo apontou uma maior concentração na região MATOPIBA (Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia), centro do MT e centro-oeste do MS, explicada pelas frentes de expansão agropecuária presentes nestas áreas. Os estados do MA, MT e BA foram os que mais desmataram áreas com formações florestais no período, 13.903 km<sup>2</sup>, 6.164 km<sup>2</sup> e 5.218 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Estudos anteriores também estimaram as emissões por desmatamento no bioma (MCT, 2010b; BUSTAMANTE *et al.*, 2012; LEITE *et al.*, 2012; MCTI, 2013; AZEVEDO, 2015). Embora estes estudos e esta pesquisa tenham representado todo o bioma, eles diferem em escala temporal, fontes de dados e métodos utilizados para estimar o carbono liberado. Ainda assim, o valor obtido pelo modelo base deste trabalho se aproxima da estimativa de Leite *et al.* (2012), que calcularam as emissões provenientes da mudança do uso e cobertura da terra para o período entre 1940 e 1995. Os autores (LEITE *et al.*, 2012 142) sobrepueram um mapa de biomassa, com valores distribuídos por fitofisionomia, com grades descrevendo os percentuais dos tipos de vegetação e conversões de uso da terra por unidade celular (célula com área de 1 km<sup>2</sup>). Como resultado, os autores encontraram emissões totais de 4,9 ± 2,7 PgC. Um subconjunto da simulação realizada neste trabalho foi extraído para comparar os resultados para o mesmo período, resultando no total de 4,36 PgC. Tomando em consideração o desvio padrão associado à estimativa de Leite *et al.* (2012), foi verificado que as estimativas estão localizadas no mesmo intervalo de valores.

Por outro lado, estimativas oficiais do país para o setor de mudança de uso da terra e florestas (LULF) (MCTI, 2013) foram de 5,52 GtCO<sub>2</sub>e para o período 1990-2010. Deste total, a conversão da vegetação nativa do Cerrado em outros usos foi responsável por 1,27 GtCO<sub>2</sub>e (23%), enquanto a Amazônia emitiu 3,81 GtCO<sub>2</sub>e (69%). Para o mesmo período, o INPE-EM BRCerrado estimou a liberação de 3,37 GtCO<sub>2</sub>e para o Cerrado, ou 61% do total de emissões para o setor de LULF no Brasil (MCTI, 2013 133). Uma possível explicação para os menores valores reportados pelo Inventário Nacional é o fato do estudo estimar o balanço de carbono, e a diferença pode ser a compensação por sumidouros de carbono (regeneração da vegetação). Wandelli e Fearnside (2015) chegaram a conclusões semelhantes quando avaliaram o potencial de acúmulo de biomassa da regeneração florestal na Amazônia, o que significa que os resultados do Inventário Nacional (MCTI, 2013) devem ser interpretados com cautela.

Finalmente, Bustamante *et al.* (2012) estimaram as emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao setor da pecuária no Brasil entre 2003 e 2008. Os autores utilizaram taxas históricas de desmatamento e valores de biomassa total (biomassa acima do solo e biomassa viva abaixo do solo), sobreposto ao mapa uso da terra do PROBIO (SANO *et al.*, 2008 159) para obter estimativas (BUSTAMANTE *et al.*, 2012). Utilizando uma versão anterior do INPE-EM, seus resultados apontaram que, entre 2003 e 2008, o Cerrado emitiu 241,6 MtonCO<sub>2</sub>e·ano<sup>-1</sup>, totalizando 1,45 GtonCO<sub>2</sub>e. Do total das emissões anuais, 136,5 MtonCO<sub>2</sub>e·ano<sup>-1</sup> correspondeu à conversão de vegetação nativa em pastagens. Para o mesmo período, este trabalho estimou a emissão de 1,08 GtonCO<sub>2</sub>e, com média anual de 180,8 MtonCO<sub>2</sub>e·ano<sup>-1</sup>. Como esperado, as estimativas deste estudo foram superiores aos valores estimados por Bustamante *et al.* (2012). Dentre as razões, o INPE-EM BRCerrado considera as emissões de desmatamento, independentemente do tipo de conversão (se pastagens ou culturas), enquanto Bustamante e colaboradores consideraram apenas as conversões do Cerrado em pasto (56,5% das terras desmatadas).

As estimativas obtidas com o INPE-EM para o Cerrado no período 1960-2010 foram comparadas às obtidas para a Amazônia brasileira, derivadas de uma versão anterior do INPE-EM (AGUIAR *et al.*, 2012). Embora as taxas de desmatamento tenham sido 21% inferiores na Amazônia (736.257 km<sup>2</sup>) em comparação com o Cerrado (989.816 km<sup>2</sup>), as emissões históricas para a Amazônia (35,92 GtonCO<sub>2</sub>e) são 7,21 vezes superiores às estimadas para o Cerrado (4,98 GtonCO<sub>2</sub>e). Considerando o conjunto de dados

especialmente explícitos elaborados pelo MMA para o período 2002-2010 (MMA, 2009; 2011a; b), um total de 99.180 km<sup>2</sup> foram desmatados no Cerrado, em comparação aos 125.495 km<sup>2</sup> na Amazônia, levando à emissão de 1,33 GtonCO<sub>2</sub>e e 7,13 GtonCO<sub>2</sub>e, respectivamente. As disparidades marcantes estão relacionadas aos valores de densidade de biomassa mais elevados na Amazônia. Enquanto o Cerrado apresenta uma biomassa acima do solo média de 7,2 Mg.ha<sup>-1</sup> nas formações campestres, 24,4 Mg.ha<sup>-1</sup> nas formações savânicas e 80,4 Mg.ha<sup>-1</sup> nas formações florestais (MIRANDA *et al.*, 2014), a biomassa média de áreas desmatadas na Amazônia foi de 205 ± 32 Mg.ha<sup>-1</sup> entre 1990-1999 e de 216 ± 31 Mg.ha<sup>-1</sup> entre 1990-2009 (OMETTO *et al.*, 2014).

### *Cenários*

Foram também apresentadas as estimativas anuais de emissão de CO<sub>2</sub> para diferentes cenários de desmatamento, compreendendo o período entre 2016 e 2030. As estimativas apontaram que a revisão do Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), representadas pelo Cenário A, pode contribuir com a emissão de 2 GtonCO<sub>2</sub> (0,55 PgC) para a atmosfera. Este valor representa mais da metade da emissão de 0,81 PgC estimados para um ano em toda a região pantropical, de acordo com Harris *et al.* (2012). Diante disso, foram propostas alterações na Contribuição Nacionalmente Determinada Pretendida - iNDC (BRASIL, 2015) visando reduzir os níveis de emissão ao zerar o desmatamento ilegal no bioma até 2030. Os resultados apontaram que o emprego destas alterações na iNDC original reduziria em 39% as emissões, passando de 988 MtonCO<sub>2</sub> (0,27 PgC) (Cenário A) para 815 MtonCO<sub>2</sub> (0,22 PgC) (Cenário C). Em última instância, os cenários apresentados também evidenciam a estocagem de carbono como outro serviço ecossistêmico importante oferecido pelo Cerrado, além da própria conservação da biodiversidade e proteção dos recursos hídricos. Contudo, cabe ressaltar que no presente estudo não são consideradas emissões provenientes do solo, portanto, a importância relativa do Cerrado no balanço de emissões pode ser entendida como conservadora.

## **6.2 Considerações sobre aspectos metodológicos**

### *Análise de Agrupamentos*

O método de Análise de Agrupamentos permitiu identificar, de forma eficiente e estatisticamente robusta, sub-regiões no Cerrado com características ambientais e socioeconômicas homogêneas, para distintas escalas temporais. Além de uma técnica

robusta para redução de dados, trata-se de uma ferramenta valiosa para identificar padrões latentes por meio de agrupamentos que frequentemente não são discerníveis com outras técnicas de análise multivariada (HAIR *et al.*, 2009). Neste trabalho, a técnica foi utilizada para reconhecer os padrões referentes aos atores sociais e processos de desmatamento que atuam em tais sub-regiões.

#### *Análise de incertezas*

A maior fonte de incertezas associadas às estimativas de emissão de carbono por desmatamento obtidas com o INPE-EM BRCerrado foi o mapeamento das áreas desmatadas no bioma. Diferenças até três vezes superiores foram observadas quando comparadas as estimativas obtidas com os dados espacialmente explícitos das duas fontes de dados analisadas neste trabalho. Diferenças nas metodologias de detecção, na resolução espacial das imagens utilizadas e nas séries temporais foram responsáveis pela discordância de aproximadamente 146% na área desmatada detectada pelas fontes de dados.

Além das incertezas relacionadas ao mapeamento de áreas desmatadas, são grandes as incertezas relacionadas à distribuição espacial da biomassa e à forma como os demais parâmetros relacionados são representados nos modelos de estimativas de emissão de carbono. A diferença na estimativa de emissão com os submodelos alternativos podem atingir 17,5% em relação ao modelo base, valor próximo aos 20% encontrados por Aguiar *et al.* (2012) ao aplicar o INPE-EM à Amazônia brasileira.

Não só os componentes de biomassa e desmatamento representam grande fontes de incertezas nos modelos de estimativas de emissão de efeito estufa. Segundo Aguiar *et al.* (2012), a definição de todos os parâmetros carregam incertezas associadas e precisam de avanços científicos para subsidiar o aprimoramento da representação dos diversos processos associados ao desmatamento. O processo de remoção da vegetação nativa, representado no INPE-EM pelo componente *ClearCutDeforestation*, é um deles. O modelo INPE-EM BRCerrado desenvolvido no âmbito desta tese considerou valores médios obtidos em literatura científica para representar os processos envolvidos na remoção da vegetação no Cerrado, desta forma acrescentando incertezas nas estimativas. Para redução destas incertezas associadas ao componente *ClearCutDeforestation* é necessário a

realização de trabalhos de campo para refinar os parâmetros e melhor representar os diferentes caminhos que o carbono pode tomar no desmatamento do Cerrado Brasileiro.

### **6.3 Recomendações para políticas públicas**

A política ambiental brasileira priorizou e obteve sucesso na redução de emissões por desmatamento na Amazônia durante a última década. Contudo, deve começar a tratar os sistemas de uso da terra como sistemas abertos. Ações de conservação ambiental focadas em biomas específicos correm o risco de se tornar ineficientes a medida que o uso da terra pode ser rapidamente deslocado para outras regiões. O desmatamento na Amazônia, por exemplo, caiu 55% no período 2010-2014 em relação ao período 2005-2009 (INPE, 2015). Contudo, neste mesmo período, o desmatamento no bioma vizinho Cerrado aumentou 41% (LAPIG, 2015). Este aumento pode ser um dos principais efeitos colaterais das medidas que compõem a Política Nacional para Mudança do Clima-PNMC (Lei 12.187/2009), a qual concentra ações mitigatórias em biomas específicos com base em metas de emissões. Neste sentido, permanece incerta a contribuição efetiva de intervenções políticas já adotadas ou em planejamento como REED+ e, mais recentemente, a iNDC/Brasil, uma vez que as forças adjacentes que movem a expansão agrícola no Brasil continuam as mesmas. Ações focadas em áreas florestais ricas em carbono podem pressionar ainda mais o deslocamento da agricultura para biomas de baixo carbono como o Cerrado. Além disso, as estratégias de conservação ambiental devem considerar a inclusão de outros serviços ecossistêmicos como a manutenção da biodiversidade e proteção dos recursos hídricos, em conjunto com a estocagem de carbono.

Existe ainda a necessidade de melhorar e ampliar a cobertura dos sistemas de monitoramento ambiental no Brasil, hoje restritos à Amazônia. Além de monitorar o desmatamento, também é necessário conhecer a destinação dada a áreas convertidas. Sem este tipo de informação básica é extremamente arriscado dizer que o desmatamento no Brasil está controlado ou que as políticas adotadas pelo governo brasileiro foram eficientes. Hoje existe um grande vazio de conhecimento sobre a dinâmica do uso da terra na maioria dos biomas Brasileiros. Mais que inviabilizar uma análise aprofundada sobre o desempenho da política ambiental Brasileira, a ausência de informação também limita as oportunidades de aperfeiçoar recursos e ações através da definição de áreas prioritárias num país de dimensões continentais. Em última instância, a manutenção de políticas públicas fragmentadas, aliado a falta de um sistema de monitoramento adequado pode

revelar o desafio de harmonizar desenvolvimento econômico e conservação ambiental no Brasil como algo utópico.

De acordo com Lapola *et al.* (2014), a comunhão de vários fatores ambientais, políticos e socioeconômicos indicam que o Cerrado Brasileiro continuará sendo uma das principais regiões de mudanças de uso da terra no Brasil. O Cerrado, de acordo com o novo CFB, concentra o maior estoque (~400.000 km<sup>2</sup>) de área pristina legalmente disponível para expansão agrícola no Brasil (SOARES-FILHO *et al.*, 2014). Este bioma ocupa uma área 50% menor em relação ao bioma Amazônia, mas oferece o dobro de disponibilidade de terra devido a diferenças importantes tanto em relação as regras de proteção ambiental em propriedades privadas como em relação a cobertura de áreas protegidas. O Código Florestal reduz para 35% suas exigências de áreas protegidas (APs) em propriedades privadas localizadas no Cerrado sob o limite da Amazônia Legal. Nas áreas remanescentes do bioma as exigências de APs privadas caem para 20%. Além disso, apenas 12% do Cerrado é coberto por APs públicas, sendo que as APs públicas de proteção integral (sem ocupação humana) representam 2,6% do bioma. Em outras palavras, no Cerrado predominam baixos níveis de proteção ambiental, o que determina a maior disponibilidade de terra em relação ao bioma Amazônia ou qualquer outro bioma brasileiro. Além disso, o Cerrado também possui diversas características que demonstram forte aptidão agrícola como áreas mecanizáveis, solos férteis e regime climático adequado (DALLA-NORA *et al.*, 2014). Outros aspectos como terras mais baratas e infraestrutura melhorada também influenciam positivamente o balanço econômico do emergente setor agropecuário. Os preços de terra podem variar significativamente dentro de uma região, mas é possível observar valores em média 30% mais baixos na região do MATOPIBA em relação aos preços médios praticados em escala nacional (DALLA-NORA *et al.*, in prep). Em relação às regiões mais desenvolvidas do país (sul e sudeste) esta diferença pode chegar a 60%. Na prática, isso significa um horizonte temporal mais curto para recuperação de investimentos e obtenção de lucros.

O mercado de carbono também é um mecanismo previsto na nova versão do Código Florestal (BRASIL, 2012) que poderia ajudar a deter o desmatamento ilegal. De acordo com a norma, o proprietário de imóvel rural que mantiver a Reserva Legal conservada e averbada em área superior ao legalmente exigido, poderá instituir servidão do excedente por meio de Cotas de Reserva Ambiental (CRA). Soares-Filho *et al.* (2014) consideram as

CRA's como um dos mecanismos mais importantes na redução do desmatamento no país. Segundo os autores, o uso das CRA's poderia criar um mercado de negociação de terras florestadas, por meio da atribuição de valor monetário à vegetação nativa, reduzindo em 56% o déficit de Reserva Legal do país. Ainda segundo os autores, a proteção de florestas que poderiam ser legalmente desmatadas se daria pela aumento da facilidade em cumprir o Código Florestal Brasileiro pelo comércio de CRA's (com menores custos do que os da restauração florestal) (SOARES-FILHO *et al.*, 2014). Além disso, a expansão da moratória da soja para o Bioma Cerrado evitaria a difusão do desmatamento da Amazônia para o Cerrado, especialmente na frente agropecuária de MATOPIBA (GIBBS *et al.*, 2015). De acordo com os resultados obtidos nesta tese, a região MATOPIBA concentrou  $\approx 86\%$  do total de CO<sub>2</sub> emitido no período de 2002 a 2010.

#### 6.4 Sugestões para futuros trabalhos de pesquisa

- Trabalhos de campo: sugere-se a realização de trabalhos de campo com o objetivo de refinar os parâmetros utilizados no componente de remoção da vegetação (*ClearCutDeforestation*) e reduzir as incertezas associadas à sua parametrização.
- Incluir a dinâmica da vegetação secundária: recentemente, foi instituído pelo Ministério do Meio Ambiente o Projeto TerraClass Cerrado (MMA, 2015a). Assim como o realizado para a Amazônia brasileira, o TerraClass para o Cerrado irá prover o mapeamento, caracterização e análise da dinâmica do uso e da cobertura da terra no bioma. Para isso, será necessário entender não só a dinâmica da vegetação secundária no cerrado, como seu próprio conceito para as formações presentes no Cerrado Brasileiro.
- Incluir o processo de degradação florestal: atualmente não existe informação espacialmente explícita do processo de desmatamento onde a cobertura florestal ainda não foi totalmente removida, o que possivelmente será resolvido com a criação de um sistema de mapeamento da degradação florestal no Cerrado Brasileiro, o DEGRAD, previsto para 2008.
- Incluir emissões por fogo na vegetação natural: além de ser um componente determinante na estrutura e dinâmica das fitofisionomias do Cerrado, o fogo é responsável pela emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa. Emissão não só da queima da vegetação natural que está sendo desmatada para agricultura e

pecuária, mas também pelos incêndios naturais e de queima da vegetação secundária, de pastagens e nas diferentes fitofisionomias do Cerrado (FEARNSIDE, 2002). Desta forma, seus impactos potenciais na emissão de GEE é de essencial reprodução nos modelos futuros.

- Incluir emissões de carbono no solo: embora baixa, a emissão de carbono pelos solos do Cerrado pode ser potencializada pelas queimadas e mudanças de uso e cobertura da terra, devendo ser considerada em modelos futuros de emissão de GEE.
- Ampliar este estudo em escala nacional: sugere-se a reprodução das análises realizadas nesta tese para os demais biomas brasileiros, considerando suas especificidades na construção de modelos que representem adequadamente as emissões de gases de efeito estufa por desmatamento.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARD, F. et al. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, n. 2, p. n/a-n/a, 2004. ISSN 1944-9224. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1029/2003GB002142> >.

AGUIAR, A. **Modelagem de mudança do uso da terra na amazônia**: explorando a heterogeneidade intraregional. 2012. 206 p. (sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.10.18.21-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/M7t7e>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

AGUIAR, A. P. D. et al. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: the INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 18, n. 11, p. 3346-3366, 2012. ISSN 1365-2486.

AGUIAR, A. P. D. et al. Land use change emission scenarios: anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon? **Global Change Biology**, p. n/a-n/a, 2015. ISSN 1365-2486. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13134> >.

ALHO, C. J. R.; MARTINS, E. S. **De grão em grão, o cerrado perde espaço**: (cerrado, impactos do processo de ocupação). Brasília, DF: WWF, 1995.

ALVES, D. S. O processo de desmatamento na Amazônia. **Parcerias estratégicas**, v. 6, n. 12, p. 259-275, 2001. ISSN 2176-9729.

\_\_\_\_\_. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 14, p. 2903-2908, 2002. ISSN 0143-1161.

AZEVEDO, T. R. (Org.). **Análise das emissões de GEE no Brasil (1970-2013) e suas implicações para políticas públicas**. São Paulo: Observatório do Clima, 2015. 52p. Documento síntese [recurso eletrônico]. Disponível em: < [https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/seeg.tracersoft.com.br/wp-content/uploads/2015/08/sintese\\_2015.pdf](https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/seeg.tracersoft.com.br/wp-content/uploads/2015/08/sintese_2015.pdf) >. Acesso em: 04/04/2016.

BACCINI, A. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Clim. Change**, v. 2, n. 3, p. 182-185, 03/print 2012. ISSN 1758-678X. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1354> >.

BARRETTO, A. G. O. P. et al. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period. **Global Change Biology**, v. 19, n. 6, p. 1804-1815, 2013. ISSN 1365-2486. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12174> >.

BAXTER, M. J. Standardization and transformation in principal component analysis, with applications to archaeometry. **Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)**, v. 44, n. 4, p. 513-527, 1995. ISSN 00359254, 14679876. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/2986142> >.

BEUCHLE, R. et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 3// 2015. ISSN 0143-6228. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622815000284> >.

BRANDÃO, A. S. P.; REZENDE, G. C. D.; MARQUES, R. W. D. C. Crescimento agrícola no período 1999/2004: a explosão da soja e da pecuária bovina e seu impacto sobre o meio ambiente. **Economia Aplicada**, v. 10, p. 249-266, 2006. ISSN 1413-8050. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-80502006000200006&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-80502006000200006&nrm=iso) >.

BRASIL. SENADO FEDERAL. **Novo código florestal**. Brasília. LEI Nº 12.651 2012.

BRASIL. **Intended Nationally Determined Contributions (INDC Brazil)**. Brasília, 2015. 10P.

BUSTAMANTE, M. M. C. et al. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, v. 115, n. 3, p. 559-577, 2012. ISSN 1573-1480. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3> >.

BUSTAMANTE, M. M. D. C.; OLIVEIRA, E. L. D. Impacto das atividades agrícolas, florestais e pecuárias nos recursos naturais. In: EMBRAPA (Ed.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, GO: Editores Técnicos, 2008. cap. 18, p.647-669.

CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S. Análise espacial de eventos. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (orgs.). **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Cerrados (Embrapa Cerrados), 2004. p. 53-122.

DALLA-NORA, E. L. et al. Why have land use change models for the Amazon failed to capture the amount of deforestation over the last decade? **Land Use Policy**, v. 39, p. 403-411, 7// 2014. ISSN 0264-8377. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837714000246> >.

DE MIRANDA, S. D. C. et al. Regional variations in biomass distribution in Brazilian Savanna woodland. **Biotropica**, v. 46, n. 2, p. 125-138, 2014. ISSN 1744-7429. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/btp.12095> >.

DEFRIES, R. S. et al. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 99, n. 22, p. 14256-14261, October 29, 2002 2002. Disponível em: < <http://www.pnas.org/content/99/22/14256.abstract> >.

DEVROYE, L.; KRZYŻAK, A. On the Hilbert kernel density estimate. **Statistics & Probability Letters**, v. 44, n. 3, p. 299-308, 9/15/ 1999. ISSN 0167-7152. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167715299000218> >.

DIAS, B. F.; FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. D. Conservação da biodiversidade no bioma Cerrado: histórico dos impactos antrópicos no bioma Cerrado. FALEIRO, F.G.; FARIAS NETO, A. L. (eds.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. p. 303-333.

DINIZ-FILHO, J. A. F. et al. Agriculture, habitat loss and spatial patterns of human occupation in a biodiversity hotspot. **Scientia Agricola**, v. 66, p. 764-771, 2009. ISSN 0103-9016. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162009000600007&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162009000600007&nrm=iso) >.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Rodovias pavimentadas e não pavimentadas dos estados brasileiros até 2012**. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE (DNIT). 2013. **Shapefile das rodovias pavimentadas e não pavimentadas dos estados brasileiros até 2012**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/shapefiles>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

FALEIRO, F. G.; SOUSA, E. S. (eds.). **Pesquisa, desenvolvimento e inovação para o Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 138p.

FEARNSIDE, P. M. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v. 80, n. 1-3, p. 21-34, 1// 1996. ISSN 0378-1127. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378112795036474> >.

\_\_\_\_\_. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. **Climatic Change**, v. 46, n. 1/2, p. 115-158, 2000. ISSN 01650009. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005569915357> >.

\_\_\_\_\_. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, v. 16, p. 99-123, 2002. ISSN 0103-4014. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142002000100007&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142002000100007&nrm=iso) >.

FELFILI, J. M.; SOUSA-SILVA, J. C.; SCARIOT, A. Biodiversidade, ecologia e conservação do Cerrado: avanços no conhecimento. In: SCARIOT, A.; SOUZA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (eds.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2005. p. 25-44.

FERREIRA, L. G.; BUSTAMANTE, M. **Monitoramento das emissões de carbono no cerrado brasileiro**. Brasília: Britânica, 2011. 17p.

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**, v. 61, n. 2, 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**, v. 8, n. 4, p. 403-421, 2013/12/01 2013. ISSN 1747-423X. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/1747423X.2012.675363> >.

FERREIRA, M. E.; GARCIA, F. N.; ROCHA, G. F. Validação do sistema integrado de alerta de desmatamentos para a região de savanas no Brasil. - In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (XIV SBSR), 16., 2009, Natal-RN. **Anais...** São José dos Campos-SP: INPE, 2009. v. 14. p. 5219-5226. 2009.

FERREIRA, N. C. et al. An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 1, p. 47-62, 2007/01/10 2007. ISSN 0143-1161. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600835861> >.

FRANÇOSO, R. D. et al. Habitat loss and the effectiveness of protected areas in the Cerrado Biodiversity Hotspot. **Natureza & Conservação**, v. 13, n. 1, p. 35-40, 1// 2015. ISSN 1679-0073. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1679007315000031> >. Acesso em: 2015/6//.

GIBBS, H. K. et al. Brazil's Soy Moratorium. **Science**, v. 347, n. 6220, p. 377-378, 2015-01-23 00:00:00 2015. Disponível em: < <http://science.sciencemag.org/content/sci/347/6220/377.full.pdf> >.

GIBBS, H. K. et al. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 38, p. 16732-16737, 2010. ISSN 0027-8424.

GOLLNOW, F.; LAKES, T. Policy change, land use, and agriculture: The case of soy production and cattle ranching in Brazil, 2001–2012. **Applied Geography**, v. 55, p. 203-211, 12// 2014. ISSN 0143-6228. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622814002045> >.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. Bookman Editora, 2009. ISBN 8577805344.

HANSEN, M. C. et al. Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: first results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. **Earth Interactions**, v. 7, n. 10, p. 1-15, 2003. Disponível em: < <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1087-3562%282003%29007%3C0001%3AGPTCAA%3E2.0.CO%3B2> >.

HARRIS, N. L. et al. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. **Science**, v. 336, n. 6088, p. 1573-1576, 2012-06-22 00:00:00 2012. Disponível em: < <http://science.sciencemag.org/content/sci/336/6088/1573.full.pdf> >.

HOUGHTON, R. A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 500-509, 2003. ISSN 1365-2486. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00620.x> >.

HOUGHTON, R. A. et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v. 403, n. 6767, p. 301-304, 01/20/print 2000. ISSN 0028-0836. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1038/35002062> >.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de biomas do Brasil**. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2004a.

\_\_\_\_\_. **Mapa de vegetação do Brasil**. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2004b.

\_\_\_\_\_. **Censo agropecuário 2006: resultados preliminares**. IBGE, 2006.

\_\_\_\_\_. **Censo demográfico 2010 - Aglomerados Subnormais Primeiros Resultados**. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **Pesquisa pecuária municipal** - efetivo de rebanhos por município. 2014. Disponível em: < [www.sidra.ibge.gov.br](http://www.sidra.ibge.gov.br) >.

\_\_\_\_\_. **Taxas anuais de umidade do solo no Brasil**. São José dos Campos, 2012.

\_\_\_\_\_. **Precipitação estimada por satélite**. Disponível em: < [http://sigma.cptec.inpe.br/prec\\_sat/](http://sigma.cptec.inpe.br/prec_sat/)>. Acesso em: 15 abr. 2014.

\_\_\_\_\_. **Prodes** - deforestation monitoring program. **São José dos Campos**, 2016.

\_\_\_\_\_. **Taxas anuais 1988 a 2015 (atualizado 27/11/2015)**. Disponível em: < [http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes\\_1988\\_2015n.htm](http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2015n.htm)>. Acesso em: 29 nov. 2015.

JACOBSON, T. K. B.; BUSTAMANTE, M. M. D. C.; KOZOVITS, A. R. Diversity of shrub tree layer, leaf litter decomposition and N release in a Brazilian Cerrado under N, P and N plus P additions. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 10, p. 2236-2242, 10// 2011. ISSN 0269-7491. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749110004756> >.

JORDAN, G. et al. Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 3, p. 034017, 2015. ISSN 1748-9326. Disponível em: < <http://stacks.iop.org/1748-9326/10/i=3/a=034017> >.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado.. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005. ISSN 1523-1739. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x> >.

KLINK, C. A.; MOREIRA, A. G. Past and current human occupation, and land use. In: OLIVEIRA, M.S.; MARQUIS, R.J. (Eds.) **The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, 2002. cap.5, p. 69-88.

LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Clim. Change**, v. 4, n. 1, p. 27-35, 01//print 2014. ISSN 1758-678X. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2056> >.

LEITE, C. C. et al. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, n. 2, 2012. ISSN 1944-9224.

MACEDO, M. N. et al. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 4, p. 1341-1346, January 24, 2012. Disponível em: < <http://www.pnas.org/content/109/4/1341.abstract> >.

MACHADO, R. B. et al. **Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro**. Brasília, DF: Conservation International do Brasil, 2004.

MARDIA, K. V.; KENT, J. T.; BIBBY, J. M. **Multivariate analysis**. London: Academic Press, 1980.

MARÔCO, J. **Análise estatística com o SPSS Statistics**. ReportNumber, Lda, 2011. ISBN 9899676322.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO (MCT). **Emissões de dióxido de carbono no setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas**. Brasília, 2010<sup>a</sup>. 100p<sup>a</sup>.

\_\_\_\_\_. **Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF, Brasil, 2010b. v.2.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO (MCTI). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2013.

MIRANDA, H. S. et al. The fire factor. In: Oliveira, P. S.; Marquis, R. J. (eds.). **The Cerrados of Brazil - ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, 2002. p. 51-68.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Convenção sobre diversidade biológica**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1992.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) / INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no bioma Cerrado, 2002 a 2008: dados revisados**. Brasília, 2009..71p. Disponível em: < [http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf\\_chm\\_rbbio/arquivos/relatorio\\_tecnico\\_monitoramento\\_des\\_mate\\_bioma\\_cerrado\\_csr\\_rev\\_72\\_72.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/arquivos/relatorio_tecnico_monitoramento_des_mate_bioma_cerrado_csr_rev_72_72.pdf) >. Acesso em: 18-02-2016.

\_\_\_\_\_. **Monitoramento do Bioma Cerrado: 2008-2009**. Brasília, 2011a. 55p. Disponível em: < [http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf\\_chm\\_rbbio/arquivos/relatoriofinal\\_cerrado\\_2008\\_2009\\_72.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/arquivos/relatoriofinal_cerrado_2008_2009_72.pdf) >. Acesso em: 18-02-2016.

\_\_\_\_\_. **Monitoramento do Bioma Cerrado:** 2009-2010. Brasília, 2011b.65p. Disponível em: < [http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf\\_chm\\_rbbio/\\_arquivos/relatoriofinal\\_cerrado\\_2010\\_final\\_72\\_1.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatoriofinal_cerrado_2010_final_72_1.pdf) >. Acesso em: 18-02-2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas:** cerrado. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011c.. 200 p.

\_\_\_\_\_. **Mapeamento do uso e cobertura do cerrado:** Projeto TerraClass Cerrado 2013. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2015a. 67 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA) / INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Monitoramento do Bioma Cerrado:** 2010-2011. Brasília, 2015b. 16p. Disponível em: < [http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80120/PPCerrado/Relatorio%20Tecnico\\_Bioma%20Cerrado\\_2011vfinal.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80120/PPCerrado/Relatorio%20Tecnico_Bioma%20Cerrado_2011vfinal.pdf) >. Acesso em: 18-02-2016.

MOOI, E.; SARSTEDT, M. Cluster analysis. In: MOOI, E.; SARSTEDT, M. (Eds.). **A concise guide to market research:** the process, data, and methods using IBM SPSS statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p.237-284. ISBN 978-3-642-12541-6.

MOYSÉS, A.; SILVA, E. R. D. Ocupação e urbanização dos cerrados: desafios para a sustentabilidade. **Cadernos metrópole,**São Paulo, v. 20,p. 197-220, 2008.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 02/24/print 2000. ISSN 0028-0836. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1038/35002501> >.

NELSON, A. **Travel time to major cities:** a global map of Accessibility. 2008. Disponível em: < <http://mfkp.org/INRMM/article/13948833> >.

NEPSTAD, D. et al. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1118-1123, 2014-06-06 00:00:00 2014. Disponível em: < <http://science.sciencemag.org/content/sci/344/6188/1118.full.pdf> >.

NEVES, M. C. Procedimentos **eficientes para regionalização de unidades socioeconômicas em bancos de dados geográficos.** 2003. 160 p. (INPE-10289-TDI/908). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/02.20.17.21>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; RATTER, J. A. Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome. **The Cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a Neotropical savanna**, p. 91-120, 2002.

OMETTO, J. P. et al. Amazon forest biomass density maps: tackling the uncertainty in carbon emission estimates. **Climatic Change**, v. 124, n. 3, p. 545-560, 2014. ISSN 1573-1480. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-014-1058-7> >.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire ecology**, v. 7, n. 1, p. 24-39, 2011.

PIVELLO, V. R.; COUTINHO, L. M. Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in an open cerrado (Brazilian savanna). **Journal of Tropical Ecology**, v. 8, n. 04, p. 487-497, 1992. ISSN 1469-7831. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1017/S0266467400006829> >. Acesso em: 1992.

PONGRATZ, J. et al. Terminology as a key uncertainty in net land use and land cover change carbon flux estimates. **Earth System Dynamics**, v. 5, n. 1, p. 177, 2014. ISSN 2190-4979.

QUEIROZ, F. A. D. Impactos da sojicultura de exportação sobre a biodiversidade do Cerrado. **Sociedade & Natureza**, v. 21, p. 193-209, 2009. ISSN 1982-4513. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1982-45132009000200013&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132009000200013&nrm=iso) >.

RAJÃO, R.; SOARES-FILHO, B. Policies undermine Brazil's GHG goals. **Science**, v. 350, n. 6260, p. 519-519, 2015-10-30 00:00:00 2015. Disponível em: < <http://science.sciencemag.org/content/sci/350/6260/519.1.full.pdf> >.

RAMANKUTTY, N. et al. Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 51-66, 2007. ISSN 1365-2486. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01272.x> >.

RAMOS-NETO, B. M.; PIVELLO, R. V. Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies. **Environmental Management**, v. 26, n. 6, p. 675-684, 2014. ISSN 1432-1009. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s002670010124> >.

RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian Cerrado Vegetation and Threats to its Biodiversity. **Annals of Botany**, v. 80, n. 3, p. 223-230, September 1, 1997 1997. Disponível em: < <http://aob.oxfordjournals.org/content/80/3/223.abstract> >.

REDFORD, K. H. Emas National Park and the plight of the Brazilian cerrados. **Oryx**, v. 19, n. 04, p. 210-214, 1985. ISSN 1365-3008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1017/S0030605300025631> >. Acesso em: 1985.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 9/15/ 2008. ISSN 0034-4257. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442570800120X> >.

RIBEIRO, J. et al. Ocupação do bioma Cerrado e conservação da sua diversidade vegetal. In: SCARIOT, A.; SOUZA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (eds.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. p. 383-399.

RIBEIRO, J.; WALTER, B. As principais fitofisionomias do bioma cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: Embrapa Cerrados. Embrapa Informação Tecnológicas. 2008. 406p.

ROCHA, G. F. et al. Detecção de desmatamentos no bioma Cerrado entre 2002 e 2009: padrões, tendências e impactos. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/03, 2011. ISSN 1808-0936.

RODRIGUES, M. A biodiversidade dos Cerrados: conhecimento atual e perspectivas, com uma hipótese sobre o papel das matas galerias na troca faunística durante ciclos climáticos. In: SCARIOT, A.; SOUZA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (eds.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: MMA, 2005. p. 235-246.

SAATCHI, S. S. et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 24, p. 9899-9904, June 14, 2011. Disponível em: < <http://www.pnas.org/content/108/24/9899.abstract> >.

SANO, E. E. et al. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 153-156, 2008. ISSN 0100-204X. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2008000100020&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2008000100020&nrm=iso) >.

SANTOS, A. D. C.; ASSUNÇÃO, R. M. Aplicação de estruturas de dados espaciais eficientes na estimação de intensidade de processos pontuais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA (GEOINFO), 5., 2003, Campos do Jordão. Anais... São José dos Campos: INPE, 2003. CD-ROM; On-line. ISBN 85-17-00026-9, 978-85-17-00026-3. Disponível em: <<http://urlib.net/83LX3pFwXQZ3V9uMbiY/Mipqu>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

SANTOS JUNIOR, R. A. D. O. et al. Desmatamento, trajetórias tecnológicas rurais e metas de contenção de emissões na Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 62, p. 56-59, 2010. ISSN 0009-6725. Disponível em: < [http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252010000400019&nrm=iso](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252010000400019&nrm=iso) >.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965. ISSN 00063444. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/2333709> >.

SILVA, L. L. O papel do estado no processo de ocupação das áreas de cerrado entre as décadas de 60 e 80. **Caminhos de Geografia**, v. 2, n. 2, 2001. ISSN 1678-6343.

SOARES-FILHO, B. et al. Cracking Brazil's forest code. **Science**, v. 344, n. 6182, p. 363-364, 2014. ISSN 0036-8075.

SPAROVEK, G. et al. Effects of Governance on Availability of Land for Agriculture and Conservation in Brazil. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 17, p. 10285-10293, 2015/09/01 2015. ISSN 0013-936X. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b01300> >.

SPERA, S. A. et al. Land-Use Change Affects Water Recycling in Brazil's Last Agricultural Frontier. **Global Change Biology**, p. n/a-n/a, 2016. ISSN 1365-2486. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13298> >.

TYRON, C. McC. **Evaluations of adolescent personality by adolescents**. University of Michigan / Society for Research in Child Development, National Research Council, 1939. v. 4. Monograph of Society for Research on Child Development.

TYUKAVINA, A. et al. Aboveground carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 7, p. 074002, 2015. ISSN 1748-9326. Disponível em: < <http://stacks.iop.org/1748-9326/10/i=7/a=074002> >.

VALENTI, M.; CIANCIARUSO, M.; BATALHA, M. Seasonality of litterfall and leaf decomposition in a cerrado site. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, p. 459-465, 2008. ISSN 1519-6984. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1519-69842008000300002&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842008000300002&nrm=iso) >.

VALERIANO, M. D. M. **TOPODATA**: guia de utilização de dados geomorfométricos locais. São José dos Campos: INPE, 2008.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional**: o projeto TOPODATA. São José dos Campos: INPE, 2008.

WANDELLI, E. V.; FEARNESIDE, P. M. Secondary vegetation in central Amazonia: Land-use history effects on aboveground biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 347, p. 140-148, 7/1/ 2015. ISSN 0378-1127. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112715001498> >.

WARD, D. E. et al. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B Experiment. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 97, n. D13, p. 14601-14619, 1992. ISSN 2156-2202. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1029/92JD01218> >.

WINKLER, H. Energy policies for sustainable development in South Africa. **Energy for sustainable Development**, v. 11, n. 1, p. 26-34, 2007. ISSN 0973-0826.

ZARIN, D. J. Carbon from Tropical Deforestation. **Science**, v. 336, n. 6088, p. 1518-1519, 2012-06-22 00:00:00 2012. Disponível em: < <http://science.sciencemag.org/content/sci/336/6088/1518.full.pdf> >.