



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Geociências

PAULO ROBERTO MENDES PEREIRA

MODELAGEM DINÂMICA DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA
MESORREGIÃO SUL MARANHENSE

CAMPINAS-SP

2024

PAULO ROBERTO MENDES PEREIRA

MODELAGEM DINÂMICA DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA
MESORREGIÃO SUL MARANHENSE

TESE APRESENTADA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM GEOGRAFIA
NA ÁREA DE ANÁLISE AMBIENTAL E DINÂMICA
TERRITORIAL

ORIENTADOR(A): PROF(A). DR(A). EDSON LUIS BOLFE

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA PELO ALUNO PAULO ROBERTO
MENDES PEREIRA E ORIENTADA PELO PROF. DR.
EDSON LUIS BOLFE

CAMPINAS-SP

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca do Instituto de Geociências
Marta dos Santos - CRB 8/5892

P414m Pereira, Paulo Roberto Mendes, 1988-
Modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra para a Mesorregião Sul
Maranhense / Paulo Roberto Mendes Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Edson Luis Bolfe.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),
Instituto de Geociências.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Expansão territorial. 3. Autômato celular. 4.
Cerrados. 5. Maranhão. I. Bolfe, Edson Luis, 1974-. II. Universidade Estadual
de Campinas (UNICAMP). Instituto de Geociências. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Dynamic modelling of land use and land cover in the Southern
Region of Maranhão

Palavras-chave em inglês:

Remote Sensing

Territoriaial expansion

Cellular automation

Cerrados

Maranhão (Brazil)

Área de concentração: Análise Ambiental e Dinâmica Territorial

Titulação: Doutor em Geografia

Banca examinadora:

Edson Luis bolfe

Taíssa Caroline Silva Rodrigues

Marcelino Silva Farias Filho

Raul Reis Amorim

Marcos Cesar Ferreira

Data de defesa: 03-07-2024

Programa de Pós-Graduação: Geografia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-8749-6699>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5036994849631207>



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

AUTOR: Paulo Roberto Mendes Pereira

**“MODELAGEM DINÂMICA DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA
MESORREGIÃO SUL MARANHENSE”**

ORIENTADOR: PROF. DR. Edson Luis Bolfe

Aprovada em: 03/07/2024

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Edson Luis Bolfe - Presidente

Profa. Dra. Taíssa Caroline Silva Rodrigues

Prof. Dr. Raul Reis Amorim

Prof. Dr. Marcos Cesar Ferreira

Prof. Dr. Marcelino Silva Farias Filho

A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora consta no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 03 de julho de 2024.

Dedicatória

Dedico esse trabalho a toda a minha família, especialmente a minha querida e amada mãe Terezinha de Jesus e a meu pai Raimundo Nonato (in memoriam), a meu irmão Ricardo Mendes, minha cunhada Mônica Gouveia e aos meus sobrinhos, Cecília e Davi.

Agradecimentos

Ao longo de todo o percurso construtivo dessa pesquisa, pude contar com a colaboração de diversas pessoas e instituições que colaboraram de forma direta e indireta para o alcance dos resultados e a sua finalização, sem vocês não seria possível a sua realização, e aqui expresso minha gratidão.

Agradecer a Deus por todos os livramentos e bençãos alcançadas, por ter me dado força, saúde e determinação para superar todas as dificuldades que surgiram durante do desenvolvimento desse estudo.

A minha mãe Terezinha e a meu pai Raimundo (*in memoriam*), só tenho a agradecer por sempre estarem ao meu lado em todas as minhas decisões, pelo carinho, amor incondicional, conselhos, orações, e todo o apoio durante o processo de minha formação. A meu irmão Ricardo, minha cunhada Mônica e meus sobrinhos Cecilia e Davi, por todo o convívio, amizade e ajuda durante todo o período que eu me encontrei ausente.

Ao meu orientador, Professor Édson Luis Bolfe pelo acolhimento, todo o incentivo, apoio, amizade, paciência e valiosas contribuições durante o processo de orientação, que formam enriquecedoras para a conclusão desta pesquisa, além de fundamentais para minha evolução pessoal e acadêmica como pesquisador.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa professores Marcos Cesar Ferreira e Taíssa Caroline Silva Rodrigues, Marcelino Silva Farias Filho e Raul Reis Amorim pelas enriquecedoras contribuições para a construção e finalização desse trabalho.

Um agradecimento especial aos meus grandes amigos Audivan Ribeiro, Jacilene Castro (Jacy), Janilci Serra (Jane) pela parceria desde os tempos de graduação e pelo auxílio nas atividades de campo, conversas e sugestões para a pesquisa, além da parceria, do convívio e conselhos dados desde o tempo de graduação, são mais de quatorze anos de amizade, a vocês minha gratidão.

Agradeço a meu grande amigo e parceiro de pesquisa professor Francisco Wendell (Chicó) por todo apoio dado a mim para a realização da tese, acompanhando vários momentos importantes, tais como: atividades de campo, nas discussões e produções de artigos, validação dos mapeamentos e da construção da própria tese. Ao meu irmão Ricardo que me acompanhou nas atividades de campo, abdicando de seus momentos de lazer e convívio familiar para me ajudar nas atividades da tese.

Aos meus compadres e queridos amigos Marco Aurélio e Priscila Coelho que me deram a honra de ser o padrinho de Vitória, pelo convívio, parceria e conselhos (quase nunca seguidos), me aturando nesses mais de dez anos de amizade.

Quero agradecer de forma especial ao Marcel Andrade, ao Anderson, ao Sérgio Nogueira por todo o suporte para a construção e modelagem dos dados, ajudando um completo desconhecido no momento de desespero, sendo fundamentais para a realização dessa tese, vocês têm a minha gratidão.

A Liana Mafra pelos conselhos para a construção e toda a correção ortográfica do texto em um período tão curto de tempo, obrigado.

Aos meus amigos desde os tempos de graduação André Felype, Mauricio Vale, Teresa Cristina, Valdir Cutrim, Jacenilde Soares, Zélia Nunes, Dinazilda Mendes, Juan Guilherme, Antonia Suelly, Jovane Santos, pelos anos de convívio, amizade e parceria nesses mais de 12 anos de amizade.

Aos integrantes do Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais por todas as atividades, parcerias em pesquisa e pelo convívio diário, em especial a professora Marita Rodrigues (minha querida orientadora de graduação) e ao professor Antônio Cordeiro Feitosa, que participaram de minha formação acadêmica.

A todos os meus professores que foram fundamentais para a minha formação, em especial aos professores Marcelino Silva, Juarez Diniz, Marita Ribeiro, Antônio Cordeiro, João Batista, Juarez Pinheiro, Roberta Maria.

Aos amigos de república, Zeliane (Zely), Marly, Idevan, Antônio, Vanderson, Marcos e Juciana, pelo tempo que compartilhamos conhecimentos, ideias, discussões, brincadeiras, em geral, pelo convívio quase que diário.

Aos integrantes do Laboratório de Métodos Avançados de Análise Geoespacial em especial ao Lucrêncio Macarringue, Abner Mateus, Vinícios Alves e Taya Parreiras, Mariana Navarro, Mariana Aquino, Danilo Valente, Diogo de Moura, que partilhamos conversas, resultados e dificuldades sobre nossas pesquisas, sempre um ajudando ao outro de forma harmoniosa e alegre.

As amigadas criadas durante a estadia na UNICAMP Adielson Botelho, Pedro Herculano, Rafael de São José, Gabriela Ananias (Gabis), Gilvan Parente, Sandra Estroges, Davidson, Luciano Gouveia, Milena Boaes, Vinicius, Clara Durans, Vanessa, Carol Chiode, Alexandra (Alê), Adriana Fantinati, Kézia Andrade, por toda a convivência e parceria quase que diária no IG.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Unicamp, que compartilharam de seus conhecimentos durante a jornada do doutorado. Aos Funcionários da Secretaria de Pós do Instituto de Geociências pelo auxílio necessário em todas as etapas da pós. A todos os funcionários do IG, que compartilham diariamente o ambiente do instituto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Fatores como políticas públicas, condições ambientais favoráveis e investimento público-privado têm moldado a dinâmica de uso e cobertura da terra no Cerrado maranhense. Nos últimos anos, essa região apresentou elevado incremento de áreas antropizadas em detrimento da vegetação natural, principalmente na mesorregião Sul Maranhense. Esta pesquisa objetivou mapear, quantificar e simular as transformações de uso e cobertura da terra em função da expansão da agropecuária no período de 1990 e 2030 para a mesorregião. Para tanto, utilizou-se uma série de rotinas que envolveram processamento, segmentação e extração de atributos derivados da matriz de coocorrência e de um conjunto de imagens orbitais de média resolução espacial da série Landsat, com recorte temporal 30 anos (1990 a 2020). Essas imagens foram classificadas a partir do algoritmo de aprendizagem de máquina *Random Forest* (RF). O treinamento do algoritmo foi realizado com base em um conjunto de amostras obtidas a partir de interpretação visual de imagens de média e alta resolução em associação com levantamentos *in loco*, sendo identificadas oito classes de uso e cobertura de terra. A validação foi realizada segundo métricas quantitativas derivadas da matriz de confusão, como acurácia global, índice Kappa e f1-score. A partir dos mapas finais, realizaram-se análises estatísticas quinquenais a fim de detectar as principais transições entre as classes de uso e cobertura da terra no período. Como resultado, todos os mapas finais apresentaram exatidão global superior a 70%. As maiores confusões ocorreram entre as classes pastagens, culturas temporárias e formações campestres, fator que pode estar relacionado à proximidade espectral entre essas classes. Já os resultados mostraram uma significativa redução das formações savânicas e campestres, convertidas principalmente em agricultura e pastagens, predominando na porção Central e Noroeste, com destaque para os municípios de Balsas, Riachão, Tasso Fragoso, Carolina e Porto Franco. A etapa de modelagem da expansão da agropecuária sobre remanescente de vegetação natural foi analisada até o ano de 2030 e realizada na plataforma Dinâmica Ego (*Environment for Geoprocessing Objects*). Utilizou-se uma abordagem baseada em autômatos celulares integrados ao método de pesos e evidências, sendo gerados a partir de um conjunto de variáveis estáticas e dinâmicas relacionadas a mudanças de uso e cobertura da terra. A etapa de calibração mostrou que a presença de áreas já consolidadas é o principal vetor de expansão da agricultura, com os maiores pesos. A validação do modelo se mostrou satisfatória com taxa de acerto superior a 40% em janelas de 5x5. Como resultado, identificou-se que a área apresenta significativa tendência de conversão da vegetação natural, principalmente em pastagens, com maior probabilidade de expansão até 2030 e perda de aproximadamente 19% da cobertura vegetal de Cerrado, com destaque para os municípios de Campestre do Maranhão, Porto Franco, São João do Paraíso, Feira Nova, Estreito, Balsas, Tasso Fragoso e Carolina.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Expansão Agrícola; Autômatos Celulares; Dinâmica Ego; Maranhão.

ABSTRACT

Factors such as public policies, favorable environmental conditions and public-private investment have shaped the dynamics of land use and cover in the Cerrado of Maranhão. In recent years, this region has shown a high increase in anthropized areas to the detriment of natural vegetation, mainly in the South Maranhense mesoregion. This research aimed to map, quantify and simulate the transformations in land use and coverage due to the expansion of agriculture between 1990 and 2030 for the South Maranhense Mesoregion. To this end, a series of routines were used that involved processing, segmentation and extraction of attributes derived from the co-occurrence matrix and a set of medium spatial resolution orbital images from the Landsat series, with a 30-year time frame (1990 to 2020). These images were classified using the Random Forest (RF) machine learning algorithm. The algorithm training was carried out based on a set of acquired samples obtained from visual interpretation of medium and high resolution images in association with on-site surveys, eight classes of land use and cover being identified. Validation was carried out according to quantitative metrics derived from the confusion matrix, such as global accuracy, Kappa index and f1-score. Based on the final maps, five-yearly statistical analyzes were carried out in order to detect the main transitions between land use and land cover classes in the period. As a result, all final maps had an overall accuracy greater than 70%. The greatest confusion occurred between the pasture classes, temporary crops and grassland formations, a factor that may be related to the spectral proximity between these classes. The results showed a significant reduction in savannah and grassland formations, converted mainly into agriculture and pastures, predominating in the Central and Northwest portions, with emphasis on the municipalities of Balsas, Riachão, Tasso Fragoso, Carolina and Porto Franco. The modeling stage of agricultural expansion over remaining natural vegetation was analyzed until 2030 and carried out on the Dinâmica Ego (Environment for Geoprocessing Objects) platform. An approach based on cellular automata integrated with the weights and evidence method was used, being generated from a set of static and dynamic variables related to changes in land use and cover. The calibration stage showed that the presence of already consolidated areas is the main vector of agricultural expansion, with the greatest weights. Validation of the model proved to be satisfactory, with an accuracy rate greater than 40% in 5x5 windows. As a result, it was identified that the area has a significant tendency to convert natural vegetation, mainly into pastures, with a greater probability of expansion by 2030 and loss of approximately 19% of the Cerrado vegetation cover, with emphasis on the municipalities of Campestre do Maranhão, Porto Franco, São João do Paraíso, Feira Nova, Estreito, Balsas, Tasso Fragoso and Carolina.

Keywords: Remote Sensing; Agricultural Expansion; Cellular Automation; Dinâmica Ego; Maranhão.

RESUMEN

Factores como políticas públicas, condiciones ambientales favorables y financiación público-privada han moldeado la dinámica de uso y cobertura del suelo en el Cerrado en Maranhão/Brasil. En los últimos años, la región ha mostrado un aumento de áreas antrópicas en detrimento de la vegetación natural, principalmente en la mesorregión Sul Maranhense. Esta investigación tuvo como objetivo mapear, cuantificar y simular las transformaciones en el uso y cobertura del suelo debido a la expansión de la agricultura entre 1990 y 2030 para la mesorregión. Para ello fueron utilizadas una serie de rutinas que involucraron procesamiento, segmentación y extracción de atributos derivados de la matriz de coocurrencia y un conjunto de imágenes orbitales de media resolución espacial de la serie Landsat, con un marco temporal de 30 años (1990 a 2020). Las imágenes se clasificaron utilizando el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest (RF). El entrenamiento del algoritmo fue realizado con base en un conjunto de muestras obtenidas a partir de la interpretación visual de imágenes de media y alta resolución en asociación con levantamientos *in loco*, identificándose ocho clases de uso y cobertura del suelo. La validación se llevó a cabo según métricas cuantitativas derivadas de la matriz de confusión, como la precisión global, índice Kappa y f1-score. A partir de los mapas finales, se realizaron análisis estadísticos quinquenales con el fin de detectar las principales transiciones entre las clases de uso y cobertura del suelo en el período. Como resultado, todos los mapas finales tuvieron precisión general superior al 70%. Las mayores confusiones ocurrieron entre las clases de pastos, cultivos temporales y formaciones de pastizales, factor que puede estar relacionado con la proximidad espectral entre las clases. Los resultados mostraron una reducción significativa de las formaciones de sabanas y pastizales, convertidas principalmente en agricultura y pastos, predominando en las porciones Central y Noroeste, con énfasis en los municipios de Balsas, Riachão, Tasso Fragoso, Carolina y Porto Franco. La etapa de modelado de la expansión agrícola sobre remanentes de vegetación natural fue analizada hasta 2030 y realizada en la plataforma Dinâmica Ego (*Environment for Geoprocessing Objects*). Se utilizó un enfoque basado en autómatas celulares integrados con el método de pesos y evidencia, generándose a partir de un conjunto de variables estáticas y dinámicas relacionadas con cambios de uso y cobertura del suelo. La etapa de calibración mostró que la presencia de áreas ya consolidadas es el principal vector de expansión agrícola, con mayores pesos. La validación del modelo resultó satisfactoria, con una tasa de precisión superior al 40% en ventanas de 5x5. Como resultado, se identificó que el área tiene una importante tendencia a convertir la vegetación natural, principalmente en pastos, con mayor probabilidad de expansión hasta 2030 y pérdida de aproximadamente 19% de la cobertura vegetal del Cerrado, con énfasis en los municipios de Campestre do Maranhão, Porto Franco, São João do Paraíso, Feira Nova, Estreito, Balsas, Tasso Fragoso y Carolina.

Palabras clave: Teledetección; Expansión Agrícola; Autómatas Celulares; Dinámica Ego; Maranhão.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da Mesorregião Sul	28
Figura 2 – Crescimento populacional da mesorregião Sul Maranhense (1970-2010)	29
Figura 3 – Modelo esquemático do geossistema de Bertrand	36
Figura 4 – Processos relacionados à mudança de uso e cobertura da terra	39
Figura 5 – Matriz geográfica.	44
Figura 6 – Análise espacial agregada à matriz geográfica.....	45
Figura 7 – Tipos de modelos	49
Figura 8 – Fluxograma da etapa de classificação digital de imagem	57
Figura 9 – Resultado da segmentação realizado no processo de classificação	63
Figura 10 – Análise por matriz de coocorrência.....	63
Figura 11 – distribuição dos Pontos amostrais para a classificação do uso e cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense (2020)	66
Figura 12 – Distribuição amostral por classe temática.....	67
Figura 13 – Classificação pelo algoritmo Florestas Aleatórias	72
Figura 14 – Representação gráfica da matriz de erros em classificação	74
Figura 15 – Matriz de tabulação cruzada.....	77
Figura 16 – Exemplo do diagrama de Sankey para uso e cobertura da terra	78
Figura 17 – Fluxograma para a modelagem de cenários no Dinâmica Ego	81
Figura 18 – Variáveis explicativas no processo de simulação para a expansão da agropecuária na Mesorregião Sul Maranhense (2015-2020)	84
Figura 19 – Exemplificação da matriz de transição espacial analisada no Dinâmica Ego.....	86
Figura 20 – Cálculo dos pesos e evidências para o mapa de probabilidades	88
Figura 21 – Ajuste dos pesos e evidências para a variável distância de silos*.....	90
Figura 22 – Análise de correlação U e V	90
Figura 23 – Validação do processo de simulação por modelo fuzzy	93
Figura 24 – Geologia da mesorregião Sul Maranhense.....	95
Figura 25 – Diferentes estruturas sedimentares presentes na Mesorregião Sul Maranhense ...	97
Figura 26 – Tipologias climáticas da Mesorregião Sul Maranhense.....	100
Figura 27 – Climograma da estação meteorológica do município de Alto Parnaíba 1991-2020	101
Figura 28 – Climograma da estação meteorológica do município de Balsas 1991-2020.....	101
Figura 29 – Climograma da estação meteorológica do município de Carolina 1991-2020 ...	102
Figura 30 – Distribuição das chuvas na Mesorregião Sul Maranhense.....	104
Figura 31 – Feições de relevo da mesorregião Sul maranhense.....	106
Figura 32 – Hipsometria da Mesorregião Sul Maranhense	107
Figura 33 – Declividade da Mesorregião Sul Maranhense.....	109
Figura 34 – Diferentes unidades de relevo na Mesorregião Sul Maranhense	111
Figura 35 – Solos da Mesorregião Sul Maranhense	113
Figura 36 – Padrões de vegetação presentes na mesorregião Sul Maranhense	116
Figura 37 – Padrões de vegetação presentes na mesorregião Sul Maranhense	117
Figura 38 – Distribuição das Savanas no globo	119
Figura 39 – Distribuição espacial do Cerrado brasileiro	121
Figura 40 – Fitofisionomias do Cerrado.....	123

Figura 41 – Desmatamento acumulado do Cerrado entre 2001-2022	124
Figura 42 – Evolução da área plantada das principais culturas agrícolas	126
Figura 43 – Expansão da soja no Brasil entre 1990 e 2022.....	128
Figura 44 – Correntes de ocupação do Maranhão e área correspondente ao chamado "Sertões de Pastos Bons"	131
Figura 45 – Corredor de exportação norte.....	138
Figura 46 – Área plantada de soja no Maranhão (1990-2021).....	142
Figura 47 – Diferentes paisagens agrícolas do Sul Maranhense	145
Figura 48 – Classificação por aprendizado de máquina para a mesorregião Sul Maranhense	147
Figura 49 – Importância das variáveis para a composição de cada árvore de decisão.....	153
Figura 50 – Exatidão Kappa e global para as classificações digitais	154
Figura 51 – Acurácia de produtor para as classes de cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense (1990 -2020).....	156
Figura 52 – Acurácia de Usuário para as classes de cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense (1990 -2020).....	156
Figura 53 – Taxas de confusões entre as classes para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020 (porcentagem)	157
Figura 54 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (1990).....	163
Figura 55 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (1995).....	164
Figura 56 — Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2000).....	165
Figura 57 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2005).....	166
Figura 58 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2010).....	167
Figura 59 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2015).....	168
Figura 60 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2020).....	169
Figura 61– Dinâmica espaço-temporal das classes de uso e cobertura na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020).....	170
Figura 62 – Perda da cobertura vegetal natural de cerrado na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	172
Figura 63 – Dinâmica de perda de cobertura vegetal natural de cerrado na Mesorregião Sul Maranhense (1990-2020).....	173
Figura 64– Classes de uso agropecuário (agricultura, pastagem e silvicultura) na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	175
Figura 65 – Hidrelétrica no rio Tocantins em Estreito -MA.....	176
Figura 66 – Perdas e ganhos na mesorregião Sul Maranhe (1990 e 2020)	178
Figura 67 – Mudanças entre as classes antrópicas não agrícolas na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020).....	179
Figura 68 – Sankey para as transições de uso e cobertura da terra	180
Figura 69 – Tamanho dos polígonos de conversão na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	182
Figura 70 – Transições espaciais para as formações florestais, savânicas e campestres na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	184
Figura 71 – conversão da vegetação natural de cerrado em agropecuária na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020).....	186
Figura 72 – Dinâmica de transição entre as formações	195
Figura 73 – Coeficiente de pesos e evidências das principais variáveis atuantes para a conversão de formações campestres em pastagens	198

Figura 74 – Coeficientes dos pesos e evidências das principais variáveis atuantes na conversão de formações savânicas em pastagens	200
Figura 75 – Coeficientes dos pesos e evidências das principais variáveis atuantes na conversão de formações campestres em agricultura	202
Figura 76 – Coeficientes dos pesos e evidências das principais variáveis atuantes na conversão de formações savânicas em agricultura	203
Figura 77 – Probabilidade de transição das formações florestais, savânicas e campestres em pastagens na mesorregião Sul Maranhense (2015-2020)	207
Figura 78 – Validação conforme múltiplas janelas.....	211
Figura 79 – Comparação entre o mapa real e mapa simulado para a mesorregião Sul Maranhense.....	213
Figura 80 – Uso e cobertura da terra entre na mesorregião Sul Maranhense (1990-2030)....	218
Figura 81 – Padrão real e simulado de uso e cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense entre 1990 e 2030	219
Figura 82 – Conversão entre as formações florestais, savânicas e campestre na mesorregião Sul Maranhense (2020-2030)	221

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Escalas de análise da paisagem de Bertrand	37
Quadro 2 – cronologia do programa Landsat	58
Quadro 3 – Características do Landsat 5	59
Quadro 4 – Características do Landsat 8	60
Quadro 5 – Atributos extraídos a partir da matriz de coocorrência de nível de cinza	64
Quadro 6 – Chave de interpretação para mapeamento de uso da terra da Mesorregião Sul Maranhense.....	69
Quadro 7 – Variáveis com valores superiores a 0,40.....	91
Quadro 8 – Unidades geológicas da Mesorregião Sul Maranhense	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- População dos municípios da mesorregião Sul Maranhense	30
Tabela 2 - Amostragem de treinamento para treinamento do RF	68
Tabela 3 – Amostragem classificatória dos dados de validação	75
Tabela 4 – Percentual de transição entre as classes naturais e antrópicas (%)	86
Tabela 5 - Compartimentação hipsométrica da Mesorregião Sul Maranhense*	106
Tabela 6 - Declividade da Mesorregião Sul Maranhense	108
Tabela 7 - Taxa de proteção do Bioma Cerrado	124
Tabela 8 - Desmatamento do cerrado acumulado por estado entre 2001 e 2022	130
Tabela 9 – comparação de desempenho do f1-score	148
Tabela 10 - Produtor e usuário	148
Tabela 11 - Teste z para os classificadores utilizados	150
Tabela 12 - acurácia conforme a mudança do número total de árvores de decisão	151
Tabela 13 -Kappa e Variância Kappa das classificações	155
Tabela 14 – F1 Score das classificações	158
Tabela 15 - Comparação das exatidões corrigidas e brutas	160
Tabela 16 - Uso e cobertura da terra na Mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	171
Tabela 17 - Percentual por classe para a mesorregião Sul Maranhense (1990 -2020)	177
Tabela 18 - Mudanças líquidas na mesorregião Sul Maranhense (1990 e 2020)	178
Tabela 19 - Percentual de perda por estratos de vegetação natural de cerrado na Mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	181
Tabela 20 - O total de polígonos de desmatamentos identificados na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	181
Tabela 21 -Acumulado de perda da cobertura vegetal de cerrado por municípios que compõem a mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)	189
Tabela 22 - Taxa de cobertura natural e antrópica em 2020	190
Tabela 23 - Uso e cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense (2015-2020)	192
Tabela 24 – Matriz de transição global 2015 e 2020 para a Mesorregião Sul Maranhense ...	193
Tabela 25 - Transição em % no período de 2015 a 2020	193
Tabela 26 - Parâmetros utilizados para gerar a paisagem simulada para a simulação entre 2015 e 2020 na Mesorregião Sul Maranhense	206
Tabela 27 - Comparação da validação conforme diferentes janelas de análise	210
Tabela 28 – Comparação entre as áreas mapeadas nos mapas real e simulado para a mesorregião Sul Maranhense em 2020	214
Tabela 29 - Tabulação cruzada entre o dado real e o simulado para o ano de 2020	216

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP – Acurácia de Produtor

ANN - Artificial Neural Networks

AU – Acurácia de Usuário

CBERS - China-Brazil Earth Resources Satellite

CHIRPS - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CR – Crescimento de regiões

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DT - Decision Tree

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ERTS - Earth Resources Technology Satellite

EVI - Enhanced Vegetation Index

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FUNAI - Fundação Nacional dos Povos Indígenas

GEODMA - Geographical Data Mining Analyst)

GLCM - Gray Level Co-occurrence Matriz

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

IMESC - Instituto Maranhense de estudos Socioeconômicos e Cartográficos

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais

KNN - K-Nearest Neighbors

LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite

LULC - Land Use Land Cover Change

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MMS - Multispectral Scanner System

NDBI - Normalized Difference Built-Up Index

NDWI - Normalized Difference Water Index

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

OBB - Out-of-bag

OLI Operacional Land Imager

POLOCENTRO - Programa de Desenvolvimento da Região Centro-Oeste

PRODECER - Programa de Cooperação Nipo-Brasileiro para o Desenvolvimento Agrícola dos Cerrados

PRODES - Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite

RBV - Return Beam Vidicon

RF - Random Forest

SD - Sem Data Definida

SAVI – Soil Adjusted Vegetation

SVM - Suport Vector Machine

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

TIRS - Termal Infrared Sensor

TM - Teatic Mapper

UCBS - University of Califormia, Santa Barbara

USGS - United States Geological Survey

Sumário

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Problematização e justificativa.....	25
1.2 Área de estudo.....	27
1.3 Objetivos.....	31
1.3.1 Objetivo Geral.....	31
1.3.2 Objetivos Específicos	31
1.3.3 Estrutura da tese.....	32
2 REFERENCIAL TEÓRICO	33
2.1 Paisagem, modelagem e mudanças de uso e cobertura da terra	33
2.1.1 Paisagem como categoria de análise.....	33
2.1.2 Mudanças de uso e cobertura da terra.....	38
2.1.3 Escolas corologias e locacionais e a inserção das análises de uso e cobertura da terra no âmbito geográfico	40
2.1.4 Sítio, Situação e a Matriz Geográfica na análise de uso e cobertura da terra	43
2.2 Modelagem dinâmica espacial de uso e cobertura da terra	45
2.2.1 Modelagem Dinâmica.....	45
2.2.2 Tipos de Modelos.....	49
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	52
3.1 Levantamento bibliográfico.....	52
3.2 Base de dados	53
3.2.1 Dados matriciais	53
3.2.2 Dados vetoriais	53
3.2.3 Dados tabulares.....	54
3.3 Processamento de dados topográficos e de precipitação.....	54
3.4 Classificações de uso e cobertura da terra da terra no Cerrado.....	56
3.4.1 Imagens Utilizadas.....	58
3.4.2 Segmentação	62
3.4.3 Extração de atributos	63
3.4.3 Treinamento amostral	65
3.4.4 Escolha do Classificador.....	71
3.4.5 Classificação Digital de Imagem	72
3.4.6 Exatidão das classificações	74
3.4.7 Detecção de mudanças.....	77
3.5 Atividade de campo	79
3.6 Modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra	79
3.6.1 Matriz de Transição	85
3.6.2 Pesos e evidências.....	87
3.6.3 Correlação das variáveis	90
3.6.4 Aplicação do modelo de Simulação.....	91
3.6.5 Validação do modelo.....	92
3.6 Aspectos ambientais.....	93
4 FORMAÇÃO TERRITORIAL E EXPANSÃO AGRÍCOLA NOS CERRADOS MARANHENSES.....	119
4.1 Cerrado: características ambientais e dinâmicas territoriais	119

4.2 A expansão agrícola no Cerrado	126
4.3 O Sul Maranhense	131
4.3.1 A formação territorial do sul maranhense	131
4.3.2 A expansão agrícola e as transformações do espaço agrário do sul do Maranhão	135
4.3.3 Expansão agrícola na mesorregião Sul Maranhense.....	143
5 RESULTADOS	146
5.1 Dinâmica de uso e cobertura da terra entre 1990 e 2020 na Mesorregião Sul Maranhense.....	146
5.1.2 Escolha do Classificador.....	146
5.1.3 Parâmetros de ajuste do Random Forest.....	151
5.1.4 Importância das variáveis	152
5.1.5 Aplicação do modelo de classificação RF e Validação das classificações automáticas	154
5.1.5 Correção manual de inconsistências	159
5.2 Mapeamento do uso e cobertura da terra entre 1990 e 2020.....	160
5.2.1 Transições espaciais	177
5.2.2 Dinâmica por município	188
5.3 Modelagem de uso e cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense.....	191
5.3.1 Transição espacial entre 2015 e 2020	191
5.3.2 Calibração do Modelo e importância da variável na geração do modelo	196
5.3.3 Validação.....	208
5.3.4 Cenário tendencial de expansão agrícola entre 2020 e 2030	216
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	224
REFERÊNCIAS	226

1 INTRODUÇÃO

As mudanças ambientais, em particular as de origem antrópicas, são consideradas uma das principais consequências das atividades humanas sobre o espaço geográfico, em destaque aquelas associadas às mudanças de uso e cobertura da terra, sobretudo pela velocidade de ocorrência e possíveis impactos ambientais e socioeconômicos associados a esses fenômenos (Lambin *et al.*, 2001; Bolfe, 2010; Polizel *et al.*, 2021).

O aumento da população mundial¹, expansão da agropecuária, ampliação da infraestrutura das cidades, além d outros fatores, têm contribuído para as expressivas taxas de mudanças no uso e cobertura da terra nas últimas décadas, principalmente nas regiões tropicais, que têm liderado as perdas de cobertura vegetal natural desde o ano 2000 (Austin *et al.*, 2017; FAO, 2022).

Conforme o relatório de perda de vegetação natural da *Food and Agriculture Orgnization of the United Nations* (2022), entre 2000 e 2018 mais de 90% de toda a perda de vegetação natural ocorreu nos trópicos, predominantemente na América do Sul (68 milhões de hectares desmatados) e na África (49 milhões de hectares). Entre os fatores que têm contribuído significativamente para o aumento das taxas de perda da cobertura vegetal, a expansão agrícola representou mais de 50% de todo o desmatamento global identificado, a pecuária 38% e a expansão de infraestrutura e outros usos os 12% finais.

Historicamente, no Brasil, um dos principais fatores que têm condicionado às elevadas taxas de mudanças de uso e cobertura da terra é a expansão da agropecuária². Fatores como aumento da demanda global de commodities agrícolas, características ambientais favoráveis, somados a políticas públicas, investimentos em tecnologia e pesquisa, têm atuado diretamente na organização e nos padrões de mudança de uso e cobertura da terra, na qual o bioma Cerrado tem apresentado protagonismo (Bolfe *et al.*, 2016).

Considerado um dos mais antigos biomas a se estruturar no continente sul-americano³ (Chaves, 2008), e com ocupação humana de mais de 12 mil anos (Museu do

¹ Segundo a Organização das Nações Unidas, apesar de crescimento em ritmo lento, a população mundial apresenta projeções significativas de crescimento até 2050. No ano de 2022, a população mundial alcançou 8 bilhões, com projeções de 8,5 bilhões em 2030 e 9,7 bilhões até 2050, com pico de 10,4 bilhões até 2080.

² Conforme o IBGE (2020), entre 2000 e 2018 aproximadamente 7,60% das áreas florestadas e 10,06% das formações campestres foram convertidas em pastagens com manejo, agricultura e silvicultura, apresentando respectivamente expansão de 27,11%, 44,84% e 70,06% em 18 anos. Já entre 2018 e 2020, aproximadamente 0,8% do território nacional sofreu algum processo de antropização.

³ Conforme Chaves (2008), o Cerrado se desenvolveu em algum momento do Cretáceo Superior, porém é a partir do Terciário Médio, mais ou menos 60 milhões de anos, que ele passou a apresentar as características ambientais observadas até os dias atuais.

Cerrado [s.d]), o Cerrado teve seu processo de colonização inicialmente associado ao ciclo da mineração do ouro no século XVI, sendo a agricultura uma atividade subsidiária voltada ao abastecimento das pequenas vilas formadas nesse período (Oliveira, 2002).

Com o declínio da atividade aurífera, o bioma passou por um período de “abandono”, tendo seu processo de ocupação novamente retomado a partir da chamada Marcha para o Oeste do Brasil, quando o Estado, a partir de programas de integração nacional, passou a instituir o que foi denominado por Continni *et al.*, (2020 p. 64) de “*políticas gerais que impactam a ocupação e exploração do Cerrado*”.

Apesar de iniciado ainda na década de 1950, é a partir de 1960 que o processo de ocupação e devastação do Cerrado é intensificado. Sob a tutela do Estado, foram elaborados uma série de programas⁴ voltados ao ordenamento e à ocupação do centro-oeste brasileiro, e que foram fundamentais para a inserção e a consolidação do Brasil no circuito produtivo internacional como um dos principais polos de produção de commodities agropecuários (Pires, 2000; Alves, 2006; Rocha, 2014).

A rápida expansão da agropecuária resultou em significativas transformações dos espaços do Cerrado. Estimativas apontam que nos últimos 40 anos, aproximadamente, metade desse bioma passou por algum processo de antropização⁵, sobretudo pela intensiva substituição da cobertura vegetal natural por pastagens e culturas agrícolas que somadas representam mais de 95% de toda a conversão da vegetação do Cerrado⁶ (Sano *et al.*, 2010; Brito, 2016; Assis *et al.*, 2019; Polizel *et al.*, 2021).

Conforme Ross (2009), o processo de expansão agrícola no Cerrado é espacialmente estruturado com direcionamento sul-norte, ordenado inicialmente no sul do bioma e direcionado, sobretudo a partir de 1960, para a porção centro-oeste, quando passou a ocupar inicialmente as terras altas e planas das chapadas e chapadões da porção central do Brasil.

A partir de 1980 o processo de expansão da agricultura no Cerrado apresenta direcionamento para o nordeste do Brasil, ocupando os terrenos planos da parte oeste da Bahia e recentemente sobre as chapas e chapadões dos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins, na região denominada MATOPIBA (Miranda *et al.* 2014a; Miranda *et al.*, 2014b).

⁴ Dentre esses programas pode-se destacar o estímulo à imigração⁴; investimentos em pesquisa e assistência técnica; ampliação da infraestrutura para transporte, energia, telecomunicações e armazenagem; concessão de crédito e financiamento para a ampliação da área agrícola.

⁵ Dados do TerraClass 2013 Cerrado mostraram que até 2013 as áreas antrópicas correspondiam a cerca de 43% da cobertura total mapeada do Cerrado. Já o Inpe (2020) indicou que as áreas antropizadas correspondem a aproximadamente 48% de todo o Cerrado para o ano de 2020.

⁶ De acordo com o relatório do PPCERRADO, nos últimos anos o Cerrado tem apresentado taxas de desmatamentos próximas ao registrado no bioma amazônico que possui área duas vezes maior.

Considerado a última frente de expansão da agricultura moderna nacional do Cerrado, o MATOPIBA⁷ corresponde a um amplo espaço geográfico com área em torno de 73,0 Mha – 35% do limite total do Cerrado⁸ –, atualmente responsável por significativa parcela da produção de commodities nacionais, correspondendo a aproximadamente 9,5% de toda a produção nacional, e por 19,9% de toda a produção do cerrado, sendo (Bolfe *et al.*, 2016, IBGE, 2023).

Os municípios que integram o MATOPIBA, nos últimos anos, têm liderado as estatísticas de perda de vegetação natural de Cerrado (Brito, 2016; Polizel *et al.*, 2021). Dados do Prodes-Cerrado mostram que entre os anos de 2013 a 2020 o bioma apresentou área desmatada perto de 71,6 Mha, e cerca de 60,11% de toda a supressão dessa vegetação concentrou-se no MATOPIBA, liderados pelo Tocantins que concentrou 22,77% de toda área desmatada no período analisado, seguido pelo Maranhão com 17,82%, Piauí com 10,60% e Bahia com 8,90%, fator que tem colocado o MATOPIBA no centro das discussões sobre preservação ambiental e desenvolvimento econômico (INPE, 2022).

No estado do Maranhão as elevadas taxas de perda da vegetação natural de Cerrado têm se concentrado na mesorregião Sul Maranhense, uma área de aproximadamente 6,76 milhões de hectares (Mha), composta por 19 municípios, cujo principal vetor de mudança do espaço local é a produção da agropecuária, com destaque para a agricultura e para a pecuária (IMESC, 2021).

A mesorregião Sul Maranhense caracteriza-se como o principal polo de produção agrícola do Maranhão, responsável por cerca de 30% do PIB estadual, compondo uma das principais zonas de produção nacional, na qual se sobressai a produção de soja, mas também de milho, cana-de-açúcar, arroz e pecuária, como principais produtos agropecuários (Bayma-Silva *et al.*, 2015; IBGE, 2021).

O processo expansão agrícola na mesorregião Sul Maranhense é considerado recente, e, apesar dos primeiros registros na década de 1980, é a partir de 1990 que a área passa a integrar as zonas de expansão da agricultura moderna que ocasionou uma mudança na estrutura produtiva da área, pois passou de uma agricultura tradicional para altamente tecnificada e resultou em uma intensa transformação da paisagem da porção sul do estado do Maranhão.

⁷ Acrônimo formado pelas iniciais dos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia, a região denominada de MATOPIBA foi institucionalizada a partir do Decreto nº 8.447 de 6 de maio de 2015 e revogada pelo Decreto nº 10.473/2020.

⁸ A área territorial do MATOPIBA abrange 337 municípios, 31 microrregiões situados majoritariamente no bioma Cerrado que corresponde a 86,11% de toda a região, com 7,18% abrangendo áreas características da Amazônia e 6,71% da Caatinga. Entre os fatores que impulsionaram o processo de expansão da fronteira agrícola para essa área, destacam-se a disponibilidade e os preços das terras que são inferiores a áreas com o uso agrícola já consolidado.

Como consequência, a mesorregião Sul Maranhense tem liderado as taxas de conversão da vegetação natural de Cerrado nos últimos cinco anos, superando os 10% anuais (Ferreira, 2008a; Ferreira, 2008b; Bayma Silva, 2015). Essa tendência indica a necessidade de pesquisas que mostrem o real avanço da agropecuária sobre as áreas de vegetação natural, sendo um importante recurso para o entendimento e a gestão dos recursos naturais.

Uma forma de analisar as mudanças de uso e cobertura da terra é por uso de imagens de sensoriamento remoto. Criado em 1960 por Evelyn L. Pruitt e colaboradores, o sensoriamento remoto é o registro da informação das regiões do ultravioleta, visível, infravermelho, a partir do conjunto de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes da superfície terrestre em escala global e/ou local (Menezes; Almeida, 2012).

Os produtos oriundos do sensoriamento remoto – imagens de satélites, fotografias aéreas etc. – representam importante recurso para o monitoramento das transformações do espaço geográfico que, de maneira sistemática e confiável, podem servir de instrumento para identificar as principais mudanças espaciais que ocorreram ao longo do tempo, principalmente em ambientes de grandes proporções territoriais, a exemplo da mesorregião Sul Maranhense.

Outra aplicabilidade dos mapas de uso e cobertura da terra, oriundos de mapeamentos resultantes de imagens de satélites, é a análise de tendências de mudanças por meio da utilização de modelos dinâmicos⁹ de uso e cobertura da terra (Soares-Filho, 1998a; Ferrari, 2008; Benedetti, 2010; Adami, 2011; Arcoverde, 2013; Molin, 2014; Oliveira, 2014; Pavão 2017; Bueno, 2018; Machado, 2022; Nogueira, 2022).

Soares Filho (1998a) afirma que tais processos propiciam a criação de cenários que podem servir de instrumentos na elaboração de políticas públicas em diferentes âmbitos. O uso de modelos na geografia não é recente, tendo a sua aplicação iniciada ainda na década de 1970 com estudos de Tobler (1970), porém a aplicação e o desenvolvimento têm estreita relação com a evolução computacional e o desenvolvimento dos sistemas de informações geográficas que possibilitaram avanço no emprego de modelos dinâmicos para representar fenômenos espaciais complexos, apresentando-se atualmente como um dos campos com significativa atuação nas geociências.

⁹ A modelagem se refere a um processo que resulta na geração de representação de um sistema que, ao final, pode ser comparada com o mundo real.

Desse modo, o uso de modelos de simulação que incorpore os vetores de mudanças para a análise das mudanças de uso e cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense configura-se um importante instrumento para entender a dinâmica espacial e as tendências de perda da cobertura vegetal natural de Cerrado, além da sua relevância no planejamento e na gestão dos recursos naturais para o local.

1.1 Problemática e justificativa

O Cerrado maranhense possui uma área de 212.518 km² distribuídos em 119 municípios, agrupados em 15 microrregiões, e corresponde a um setor prioritário à conservação¹⁰, principalmente por sua relevância ambiental, social e econômica (Batistella *et al.*, 2013; IBGE, 2020).

Apesar da importância para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, a área tem apresentado intensas perdas de vegetação natural. Conforme INPE (2023), entre os anos de 2015 e 2020, 835 mil hectares de vegetação de Cerrado foram convertidos em alguma classe antrópica, sendo que, desse total, apenas no ano de 2020 houve conversão de aproximadamente 165 mil hectares, números que mostram crescimento substancial quando comparados a levantamentos anteriores, colocando o estado do Maranhão entre os líderes de desmatadores do bioma.

Grande parte dessa conversão está associada à expansão da agropecuária, com destaque para as pastagens e a agricultura. De acordo com IBGE (2021), no Maranhão a produção de soja alcançou patamares significativos, com aumento de mais de 170% de área destinada à produção dessa commodity, tornando o estado em um dos sete maiores produtores do país, no qual merece destaque a mesorregião Sul Maranhense¹¹.

Esse processo resultou em profundas transformações no uso e cobertura da terra principalmente com aumento da taxa de desmatamento, fragmentação florestal e perda de biodiversidade (Bayma-Silva, 2015). Dados do Inpe (2022) mostram que os municípios que compõem a mesorregião Sul Maranhense concentraram mais de 11% de toda área desmatada do bioma somente no 2020, na qual o município de Balsas desponta como líder de perda da cobertura vegetal natural nos últimos três anos, que mostram a importância de elaboração de

¹⁰ A área é um importante setor pois abriga em seus limites rica biodiversidade, e nascentes dos principais rios como o Itapecuru, Mearim, Parnaíba e Munim. Além de uma gama de comunidades tradicionais que utilizam de maneira sustentável os recursos disponíveis. O Cerrado maranhense também é considerado o “celeiro do estado”, pois é responsável por parcela considerável da produção de grãos, carnes e derivados.

¹¹ Com uma área de 67.698,72 km² é formada por três microrregiões – Chapada das Mangabeiras, Porto Franco e Gerais de Balsas – e agrupa 19 municípios. Encontra-se localizada na porção sul do estado do Maranhão, delimitando-se ao norte com as mesorregiões Oeste Maranhense, Centro Maranhense e Leste Maranhense (Estado do Maranhão); à leste com a mesorregião Sudoeste Piauiense (estado do Piauí) e à Oeste e Sul com a mesorregião Oriental do Tocantins (estado do Tocantins). A área é considerada o polo produtivo do estado do Maranhão e possui grande destaque no cenário nacional e internacional pelo elevado potencial de produção de soja, carnes e derivados.

mapeamento das principais formas de cobertura e uso da terra, identificando quais fatores têm favorecido a perda da vegetação natural de Cerrado.

Na mesorregião Sul Maranhense, o avanço da fronteira agrícola, apesar de associada a iniciativas governamentais implementadas desde o final da década de 1970, apresentou maior reflexo nas mudanças de uso e cobertura da terra a partir de 1990 (Alves, 2006; Ferreira, 2008a. Ferreira, 2008b), quando a área passou por mudança na estrutura de produção, baseada anteriormente na pecuária e no pequeno cultivo, principalmente arroz, para monocultivos em larga escala, com maior ênfase na soja.

Entre os fatores que contribuíram para esse processo, ressaltam-se as intensas transformações associadas a formas de cobertura da terra na área que alteraram significativamente a estrutura paisagística, principalmente pela inserção de culturas agrícolas e manejos florestais, ocasionando intensos processos de fragmentação da floresta, perda da biodiversidade e alterações na dinâmica hídrica do local (MMA, 2012).

Apesar das perdas massivas da cobertura natural, uma vasta quantidade de terras com vegetação intocada está legalmente disponível para a conversão na área. Diante do exposto, a escolha do tema deve-se à necessidade de maior conhecimento sobre a dinâmica das alterações ocorridas na paisagem, com foco na análise das características e das transformações de cobertura da terra, associada principalmente à inserção da agricultura mecanizada no Cerrado maranhense, pois a partir do ano de 2012 alguns municípios que compõem a área de abrangência do Cerrado no Maranhão passaram a integrar áreas de elevada tendência a processos de desertificação, com destaque para as mesorregiões leste e sul Maranhense.

Esse processo promoveu a intensificação da substituição da cobertura vegetal natural e tem ocasionado, ainda hoje, significativas transformações espaciais na região. E, apesar de já consolidada como a principal área de produção agrícola do estado, representando mais de 45% de toda a área colhida para a safra 2018/2019, ainda se encontra em significativa expansão, fator que tem ocasionado intensas taxas de perda da cobertura vegetal de Cerrado, como demonstrado pelos dados do INPE (2023) que aponta os municípios da mesorregião Sul Maranhense como líder de perda de cobertura vegetal de Cerrado.

A tese ampara-se nos aspectos referentes aos processos de transformações espaciais e redução da cobertura vegetal natural de Cerrado ocorridas na mesorregião Sul Maranhense, utilizando classificação de imagens de média resolução, informações regionalizadas (segmentação) e modelos de classificação por aprendizado de máquina, para o entendimento da dinâmica de uso e cobertura da terra e suas projeções futuras, partindo-se da hipótese de que, se a expansão da agropecuária mantiver a tendência de

crescimento observada desde 1990, mas com recorte temporal de 2015 a 2020, tende a ocorrer elevadas taxas de conversão da vegetação natural de Cerrado até o ano de 2030.

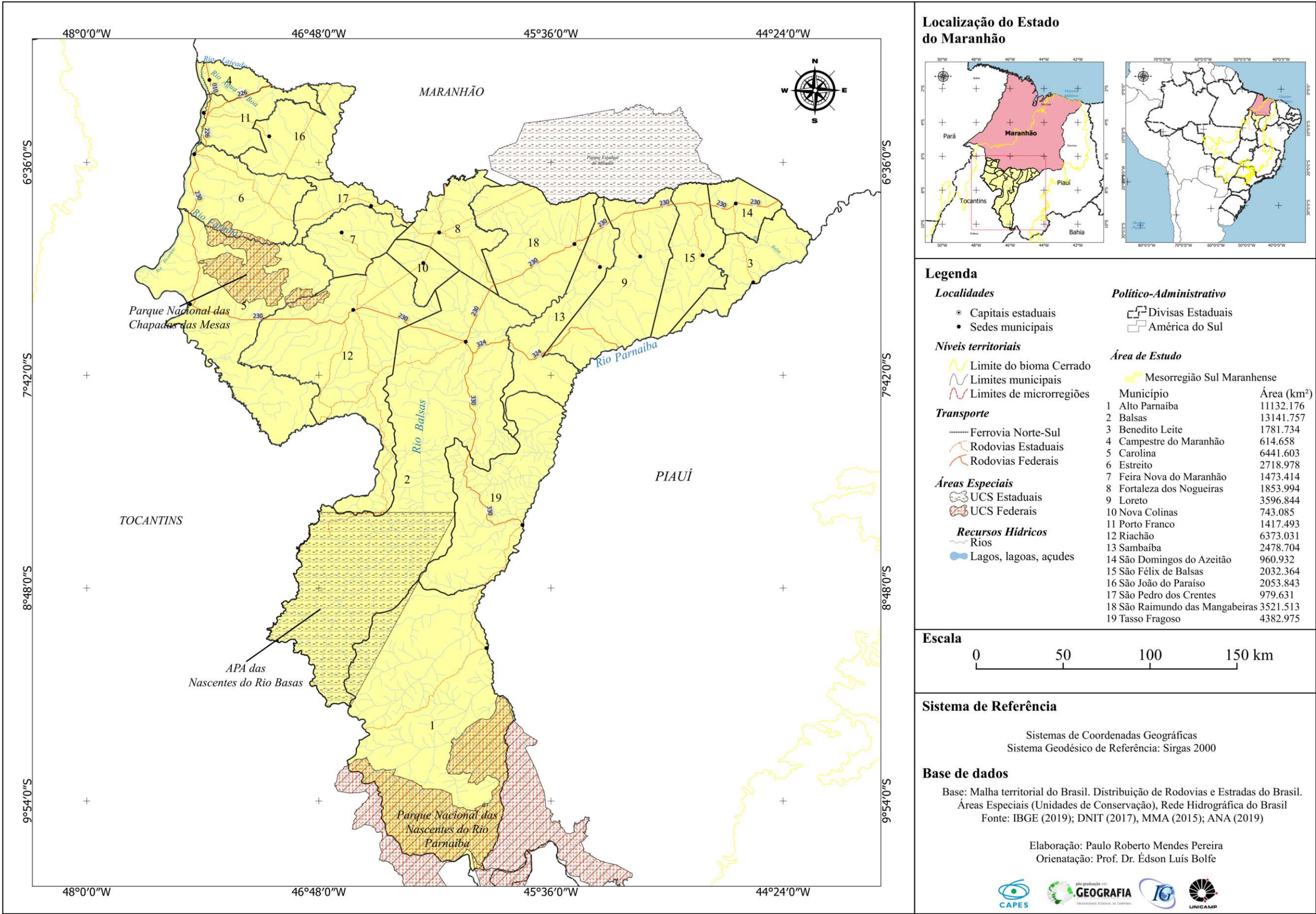
Essa hipótese buscou responder os seguintes questionamentos: i) Qual a tendência de perda da cobertura vegetal natural de Cerrado? ii) Onde estão localizadas as áreas que apresentaram maior probabilidade à perda de cobertura vegetal natural? iii) Qual classe natural apresenta maior probabilidade de conversão para a agropecuária? As políticas atuais podem intensificar as mudanças de uso e cobertura da terra para a área?.

Desse modo, cartografar e mensurar as mudanças de uso e de cobertura da terra podem mostrar as taxas reais de perda da cobertura vegetal de Cerrado na mesorregião Sul Maranhense, indicando quais as classes e quais municípios apresentaram maior padrão de conversão e maior tendências de perda da cobertura vegetal de cerrado, pois o uso da análise a partir da modelagem e simulação de uso e cobertura da terra possibilita um conhecimento dos possíveis padrões de perda da cobertura vegetal, sendo um importante instrumento para o planejamento e monitoramento das áreas de maior fragilidade na área.

1.2 Área de estudo

A área de estudo compreende a mesorregião Sul Maranhense (figura 1), localizada na porção sul do estado do Maranhão, apresenta uma área de aproximadamente 67.686,40 km², e faz limite a oeste e sul com o estado do Tocantins -municípios de Aguiarnópolis, Babaçulândia, Barra do Ouro, Campos Lindos, Darcinópolis, Filadélfia, Goiatins, Lizarda, Mateiros, Palmeiras do Tocantins-; a leste com o estado do Piauí -municípios de Uruçuí, Ribeiro Gonçalves, Porto Alegre do Piauí, Santa Filomena, Gilbués, Antônio Almeida e Barreiras do Piauí-; e a norte com os municípios de Sítio Novo, Sucupira do Norte, Pastos Bons, Ribamar Fiquene, Lajeado Novo, Mirador, Nova Iorque e Formosa da Serra Negra que pertencem ao estado do Maranhão (IBGE, 2020).

Figura 1 – Localização da Mesorregião Sul



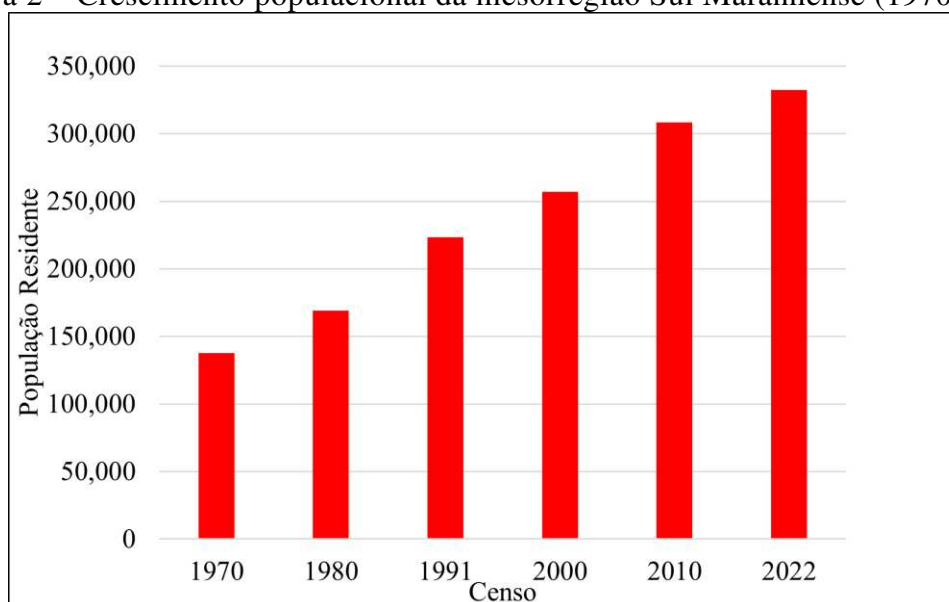
Fonte: adaptado de IBGE, 2019

A mesorregião Sul Maranhense é composta por 19 municípios que podem ser agrupados em três microrregiões, microrregião Gerais de Balsas que é formada pelos municípios de Alto Parnaíba, Balsas, Feira Nova do Maranhão, Riachão e Tasso Fragoso. Microrregião de Porto Franco que é formada pelos municípios de Campestres do Maranhão, Carolina, Estreito, Porto Franco, São João do Paraíso e São Pedro dos Crentes; e microrregião Chapada das Mangabeiras que é formada pelos municípios de Benedito Leite, Fortaleza dos Nogueiras, Loreto, Nova Colinas, Sambaíba, São Domingos do Azeitão, São Félix de Balsas e São Raimundo das Mangabeiras (IBGE, 20213).

Conforme dados do Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2023) a mesorregião possui uma população total de 332.539.893 habitantes, densidade demográfica de 5 hab./km², com aproximadamente 87% da população residindo na zona urbana. Foi identificado relativa expansão da população com crescimento de 7,82% entre os censos de 2010 e 2022, quando passou de 308.393 habitantes para 332.539 habitantes em 20022 (figura 2), esse crescimento é inferior ao observado entre os anos 2000 e 2010, quando se observou uma taxa de crescimento populacional de 19,91% (tabela 1).

Destacam-se os municípios de Balsas, São Pedro dos Crentes, São Domingos do Azeitão e Tasso Fragoso com taxa de crescimento populacional de aproximadamente 21%, 30%, 14% e 13%, respectivamente. Já os municípios de São Félix de Balsas, Campestre do Maranhão, Carolina, São e João do Paraíso, e apresentaram redução de 8%, 7%, 7% 6% de sua população entre os censos de 2010 e 2022 (IBGE, 2011).

Figura 2 – Crescimento populacional da mesorregião Sul Maranhense (1970-2010)



Fonte: Adaptado de IBGE (2011)

Tabela 1- População dos municípios da mesorregião Sul Maranhense

Municípios	Área (km²)	Total populacional						Variação			%
		1970	1980	1991	2000	2010	2022	2000-2010	2010-2022	2000-2022	2010-2022
Alto Parnaíba	11.127,38	7.209	7.731	10.336	10.174	10.766	11.109	592	343	935	3,18
Balsas	13.141,16	19.385	23.703	41.648	60.163	83.528	101.767	23.365	18.239	41.604	21,89*
Benedito Leite	1.784,64	7.374	8.439	8.960	5.288	5.469	5.469	181	0	181	0
Campestre do Maranhão	613,53				11.521	13.369	12.301	1.848	-1.068	780	-7,98
Carolina	6.267,68	28.815	34.953	24.665	23.991	23.959	24.062	-32	103	71	0,42
Estreito	2.720,27			23.031	22.930	35.835	33.294	12.905	-2.541	10.364	-7,09
Feira Nova do Maranhão	1.625,82				7.543	8.126	8.048	583	-78	505	-0,95
Fortaleza dos Nogueiras	1.853,41	7.245	9.796	12.428	11.301	11.646	12.640	345	994	1.339	8,53
Loreto	3.597,23	7.643	8.068	9.465	10.024	11.390	11.597	1.366	207	1.573	1,81
Nova Colinas	743,09				3.904	4.885	5.021	981	136	1.117	2,78
Porto Franco	1.420,51	16.058	23.142	32.403	16.840	21.530	23.903	4.690	2.373	7.063	11,02*
Riachão	6.402,83	17.831	24.223	28.058	20.983	20.209	22.145	-774	1.936	1.162	9,57
Sambaíba	2.476,13	5.110	5.506	5.743	5.261	5.487	5.568	226	81	307	1,47
São Domingos do Azeitão	961,25				6.289	6.983	7.992	694	1.009	1.703	14,44*
São Félix de Balsas	2.032,60	4.850	5.995	6.244	5.144	4.702	4.402	-442	-300	-742	-6,38
São João do Paraíso	2.052,33				10.365	10.814	9.904	449	-910	-461	-8,41
São Pedro dos Crentes	979,92				4.197	4.425	5.783	228	1.358	1.586	30,68*
São Raimundo das Mangabeiras	3.524,50	11.336	12.318	14.147	14.870	17.474	18.672	2.604	1.198	3.802	6,85
Tasso Fragoso	4.369,16	5.008	5.213	6.197	6.393	7.796	8.862	1.403	1.066	2.469	13,67*

*Municípios que apresentaram crescimento populacional superior a 10% entre os censos de 2010 e 2022

Em negrito os municípios que apresentaram retração populacional entre 2010 e 2022

Fonte: adaptado de IBGE, 2022

A área possui índice de desenvolvimento humano – IDH de 0,607, classificado como médio, possui elevada taxa de alfabetização, com índices superiores a 90% da população alfabetizada. Os dados de saneamento mostram baixo acesso a serviços de coleta de esgoto e coleta de lixo, com menos de 50% da população atendida por esses serviços (ONU, 2011).

A mesorregião Sul Maranhense, apesar de possuir elevado Produto Interno Bruto¹², concentra elevada taxa de pobreza, com cerca de 40% da população apresentando rendimento médio de até meio salário-mínimo e apenas 20% da população ocupada (IBGE, 2011). O polo regional é o município de Balsas, responsável por 3,5% de todo o Produto Interno Bruto do estado do Maranhão, tem como principal atividade econômica o setor de produtos e serviços que correspondem a 67,8% de todo o PIB municipal geral e ainda concentra os principais serviços oferecidos (rede de saúde, serviços financeiros, logístico, industrial, comercial) e favorece, assim, a concentração populacional na área (IBGE, 2021).

Esse cenário apresenta estreita relação com a dinâmica de produção agrícola, pois o município de Balsas é o principal polo de produção do estado, na qual tem como base a produção sojícola, fator que favorece também o desenvolvimento de outras atividades econômicas, que alimentam a cadeia produtiva da soja.

O setor agropecuário possui importante influência no PIB regional, responsável por 28,5% de toda a receita geral, onde Balsas foi o segundo maior produtor agrícola do estado do Maranhão no ano de 2020, com cerca de 19% da produção (609.025 toneladas), em torno de 3385 km² de área plantada, onde se destacam a soja (1.951,61 km²) – principal produto cultivado –, o milho (1.076,7 km²) e o algodão (109 km²), estando entre os 40 maiores produtores de grãos do Brasil (IBGE, 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- ✓ Compreender a dinâmica espaço-temporal das transformações de uso e cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense entre 1990 e 2020.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar o desempenho de classificadores digitais com o uso de dados regionalizados para o mapeamento das diferentes classes de uso e cobertura da terra em imagens Landsat 5 e Landsat 8 para o Cerrado maranhense;

¹² Possui em seus limites o município de Balsas que representou o terceiro maior do Maranhão no ano de 2019.

- ✓ Caracterizar os aspectos fisionômicos e estruturais que compõem a paisagem da mesorregião Sul Maranhense;
- ✓ Identificar as principais transições espaciais entre as classes de uso e cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense entre 1990 e 2020;
- ✓ Elaborar cenários probabilísticos de mudanças de uso e cobertura da terra para os anos de 2030.
- ✓ Detectar as classes de vegetação natural com maior probabilidade de conversão para a agropecuária até 2030.

1.3.3 Estrutura da tese

A tese está organizada em 5 capítulos. No primeiro capítulo apresentam-se o tema da pesquisa, os objetivos, as hipóteses e a justificativa. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica onde foi discutido temáticas importantes para o desenvolvimento da pesquisa, a saber, conceitos de uso e cobertura, classificação e detecção de mudanças de uso e cobertura da terra e a modelagem dinâmica de uso da terra, necessários para subsidiar e embasar a problemática da pesquisa.

O capítulo 3, discorrem-se sobre os materiais e os procedimentos metodológicos realizados durante as etapas de processamento digital de imagens, classificações temáticas e de modelagem dinâmica executadas para o alcance dos resultados, sendo descritas as etapas de mapeamento, fundamentais para se entender a dinâmica do local. Apresentam-se também as características da mesorregião Sul Maranhense, indicando dados sociais e ambientais que influenciam nos processos de mudança de uso e cobertura da terra.

No capítulo 4, são mostradas informações sobre o bioma Cerrado no contexto geral, no estado do Maranhão e na área de estudo, com ênfase nas características ambientais, nos processos históricos de ocupação, nas políticas de desenvolvimento econômico que subsidiaram os processos de expansão da agricultura moderna na área, apresentando o processo de formação da porção sul do estado do Maranhão, pautando os programas e as políticas públicas que influenciaram a expansão da agropecuária na área.

Já no capítulo 5 são descritos os resultados, abordando os padrões de mudança de uso e cobertura da terra no recorte temporal indicado, as taxas de perdas da cobertura vegetal, os resultados da simulação de mudança de uso e cobertura da terra, indicando os principais vetores, os municípios com maiores tendências de aumento de área agrícola e qual classe de vegetação natural possui maior tendência de conversão para áreas antrópicas até o ano de 2030.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Paisagem, modelagem e mudanças de uso e cobertura da terra

2.1.1 Paisagem como categoria de análise

A Paisagem é uma importante categoria de análise da Geografia e sua evolução tem associação direta com a evolução filosófica e conceitual na qual as diferentes ciências passaram a partir do início do século XX, que moldou o conceito de paisagem, apresentando em sua concepção multiplicidades de sentidos (Passos, 2003; Vitte, 2007).

A palavra paisagem tem sua origem do Latim “pagus” e significa país, sentido de Lugar, Região, Território, Nação, e dela derivam formas como: paisaje (espanhol), paysage (francês), paesaggio (italiano), e germânicas de “land” landschaft(alemão), landscape (inglês), landschap (holandês), sempre indicando o recorte do espaço territorial mais ou menos definido (Passos, 2003).

Sobre o conceito de paisagem, Vitte (2007) escreve que:

[...] o termo paisagem encerra uma conotação espacial (land) podendo ser caracterizada historicamente sob duas perspectivas: uma estética-fenomenológica, na qual a paisagem corresponde a uma aparência e uma representação; um arranjo dos objetos visíveis pelo sujeito por meio de seus próprios filtros. Uma outra conotação pode ser caracterizada como geopolítica, designando uma unidade territorial onde se desenvolve a vida de pequenas comunidades humanas (Vitte, 2007 p. 72).

Barbosa e Gonçalves (2014) ressaltam que a paisagem apresenta variadas interpretações, e é usada corriqueiramente no cotidiano das pessoas, na mídia escrita e falada, na arte, na literatura, na música, na arquitetura, na fotografia, contudo, somente a Geografia lhe conferiu um valor científico, transformando-a em eixo de toda uma teoria da investigação.

Na Geografia, o conceito de paisagem foi introduzido por A. Hommeyerem como *Landschaft*, “conjunto de “formas” que caracterizam um setor determinado da superfície terrestre (Passos, 2003), porém, os primeiros levantamentos de cunho geográfico relacionados à paisagem são atribuídos ao botânico e naturalista alemão Alexandre Von Humboldt (1769-1859) (Pereira, 2017).

Humboldt que elaborou seus estudos focado principalmente na distribuição da vegetação como resultado da interação entre os diferentes elementos que compõem o ambiente, formulou as bases para a consolidação da ciência geográfica da paisagem, não apenas como descrição fisionômica, mas com produto de uma confluência de pressupostos, métodos e de um embate ontológico que, desde o século XVIII, acompanhou as reflexões sobre a natureza e sua espacialidade na superfície terrestre (Schier, 2003; Vitte; Silveira 2010).

A partir das ideias de Hulboldt, outras concepções de paisagem são estruturadas. Karl Ritter (1779-1859) que analisou os aspectos “físico-natural” e o “humano” e situou a paisagem na fronteira das ciências naturais e sociais. Friedrich Ratzel (1844-1904) que desenvolveu seus trabalhos na linha do racionalismo e do positivismo ambiental, formulando a Antropogeografia e o darwinismo social¹³. Ferdinand Von Richtofen (1833-1905) tem-se uma visão da paisagem como intersecção de diferentes esferas: litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera e denominou de “*Erdoberflasche*”. E Sigrifid Passarge (1856-1958) formou as bases para um ramo da Geografia denominado de Geografia da Paisagem¹⁴ (Shier, 2003; Passos, 2006).

Carl Troll (1899-1975) incorporou aos estudos geográficos termos contemporâneos da ecologia, principalmente ecossistema¹⁵, formou as bases para “*Geografia da Paisagem*” que, posteriormente, se denominou “Geoecologia”, tendo a paisagem como entidade espacial formada pela interação entre a geoesfera, bioesfera e nooesfera. No aspecto metodológico, a análise da paisagem deve ser orientada em duas frentes: i) uma com abordagem naturalista denominada paisagem natural (*Naturlandschaft*), e ii) a outra com uma abordagem de paisagem cultural (*Kulturlandschaft*), que serviram de base para o desenvolvimento das demais escolas geográficas de paisagem, com destaque para a russa e francesa (Passos, 2003; Pereira, 2017).

Segundo Frolova (2007) na Rússia os primeiros levantamentos acerca da paisagem como uma área de pesquisa de caráter geográfico, é denominada de Geografia Física Complexa, com os primeiros estudos associados ao edafólogo russo V.V. Dokoutchaev (1848-1903) que apresentou uma concepção extremamente técnica da paisagem, e resultou na ideia de complexo territorial natural¹⁶, e introduziu a abordagem sistêmica na Geografia¹⁷ (Barbosa, 2015).

Ao analisar as interrelações entre os diferentes agentes que compõem a paisagem, Dokoutchaev contribuiu para o desenvolvimento de propostas teórico-metodológicas para

¹³ Bases para a formulação do Determinismo Geográfico, que resultou na *Landshaftskunde*, analisando a Paisagem sob uma perspectiva territorial e formou as bases para justificar a expansão territorial da Alemanha.

¹⁴ Parsage foi o primeiro autor a dedicar um livro à paisagem, *Grundlagen der Landshaftskunde* (1919-1920) resultado de levantamentos realizados no continente africano.

¹⁵Conforme Amorim (2011) o ecossistema foi proposto por Tansley em 1937 que , Ecossistema é definido por Odum (1988) como área relativamente homogênea de organismos interagindo com seu ambiente, onde a comunidade de seres vivos é o componente principal, que se interliga com os elementos abióticos do habitat, de modo que um fluxo de energia promove a permuta de materiais entre os componentes vivos e abióticos (Pereira, 2017).

¹⁶O Complexo Natural Territorial, segundo Amorim (2012), é representado como recorte do ambiente no qual ocorre a interação de componentes bióticos e abióticos que se desenvolvem no interior de um complexo sistêmico.

¹⁷ Conforme Rodrigues, Silve e Vicens (2015, p. 2), como parte de um esforço para sustentar a base teórico metodológica da ciência na União Soviética, prestou-se especial atenção ao uso generalizado da abordagem estrueto-sistêmica. Embora a Teoria Geral de Sistemas tenha sido formulada por Ludwig Von Bertalanffy nos anos 1930, desde o século XIX, Marx e Engels já tinham formulado o conceito de sistemas em perspectiva filosófica com ponto de vista dialético-materialista, considerando o sistêmico como um dos princípios da dialética.

estudos integrados do ambiente, em que o conceito de paisagem tem estreita relação com o conceito de sistemas, aproximando-o da matemática e da física, o aspecto fisionômico e estético-descritivo da paisagem é deixado em segundo plano, e passou-se a avaliar a paisagem conforme sua estrutura e funcionamento¹⁸ (Guerra; Marçal, 2010).

Conforme Barros e Pádua (2014) em 1977 Victor B. Sotchava apresenta a concepção de Geossistema como uma nova abordagem acerca dos estudos da paisagem na Rússia. Baseada nos estudos de Troll, a paisagem/geossistema é vista como um sistema ou conjunto dinâmico de elementos inter-relacionados, formado pela integração dos fenômenos naturais, embora todas as ações econômicas e sociais afetem as suas peculiaridades espaciais¹⁹.

É uma classe particular de sistemas dirigidos, sendo o espaço terrestre de todas as dimensões, onde os componentes individuais da natureza se encontram numa relação sistêmica uns com os outros e, com uma determinada integridade, interatuam com a esfera cósmica e com a sociedade humana (Maciel; Lima, 2012, p. 23).

De acordo com Neves (2015), Sotchava formulou uma proposta metodológica que substituísse os estudos baseados exclusivamente na dinâmica biológica do ecossistema, integrando os sistemas naturais e humanos, definindo o Geossistema como um modelo dinâmico e territorial formado por cinco atributos fundamentais: estrutura, funcionamento, dinâmica, evolução e informação, com delimitação espacial²⁰ e temporal.

Os Geossistemas são sistemas naturais em nível local, regional ou global, nos quais o substrato mineral, o solo, as comunidades de seres vivos, a água e as massas de ar, particulares às diversas subdivisões da superfície terrestre, são interconectados por fluxos de matéria e de energia, em um só conjunto, representando um conceito territorial com delimitação e escala” (Sotchava, 1977).

Outra escola com grande destaque para o estudo da Paisagem foi a francesa. Diferente da escola russa, passou a introduzir o condicionante antrópico como um dos fatores de atuação da composição das unidades paisagísticas, o que deu aos Geossistemas um caráter epistemológico. Apesar de apresentar um caráter naturalista, se diferencia da alemã por tornar o

¹⁸ Conforme Bertrand; Bertrand (2009) na perspectiva soviética a paisagem pode ser diferenciada em três linhas de pesquisa: os regionalistas, em torno de Solncev e de Isachenko, para quem uma *Landschaft* é uma unidade morfológica sempre localizada; D. L. Armand que considera a *Landschaft* como uma entidade sistêmica totalmente dissociada das noções corológicas; além dos tipologistas como Gvodzietski ou Saneblidze, interessados mais pela classificação que pela corologia.

¹⁹ A concepção do Geossistema foi orientada a partir da abordagem sistêmica, tendo a Teoria Geral dos Sistemas como fundamento para a teorização do meio natural, o mais simples e global, com suas estruturas e seus mecanismos, que podem ser modificados pelas ações humanas.

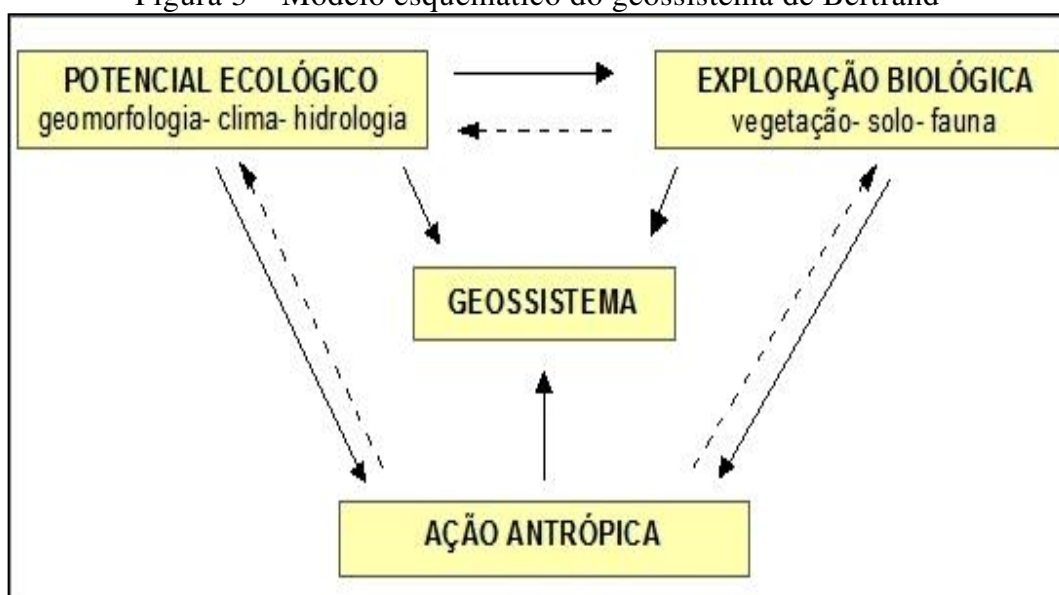
²⁰ Sospresenta uma classificação dos geossistemas em geômero (estrutura homogênea) e geócoro (estrutura diferenciada), na qual divide os geossistemas segundo suas ordens dimensionais (planetária, regional e topológica)

homem um ser ativo dentro do processo de formação da paisagem transformando-a conforme suas necessidades, assim contrária às ideias deterministas da escola alemã (Passos, 2006).

Georges Bertrand - que inicialmente segue a linha de raciocínio de Troll apoiando-se em uma concepção topológica e estrutural -, em seus levantamentos buscou entender a dinâmica da paisagem sob uma concepção metodológica, considerando inicialmente o geossistema um modelo teórico metodológico de estudo da paisagem.

Desse modo, o geossistema corresponde a combinação entre o Potencial Ecológico (clima, hidrologia, geomorfologia), a Exploração Biológica (vegetação, solo, fauna) e a Ação Antrópica (fatores sociais e econômicos na estrutura e expressão espacial), formando um complexo dinâmico que se inter-relaciona, dando, assim, importância à dinâmica social e cultural dos processos naturais do geossistema (Figura 3).

Figura 3 – Modelo esquemático do geossistema de Bertrand



Fonte: Adaptado de Bertrand (1972)

Como é apresentado na figura 3, Bertrand (1972) inclui diretamente as atividades humanas na mesma hierarquia que os demais fatores que individualizam o geossistema, caracterizado por três atributos fundamentais: morfologia, dinâmica e exploração biológica, portanto, uma unidade complexa, desenvolvida em espaço amplo constituído de certa homogeneidade, ou seja, a paisagem/geossistema corresponde a uma unidade territorial bem definida, delimitada segundo determinado nível escalar em unidades superiores e unidades inferiores, conforme destacado no quadro 1, o que diferencia do conceito de ecossistema.

Quadro 1- Escalas de análise da paisagem de Bertrand

Unidades de paisagem	Escala têporo-espacial (A.Cailleux J. Tricart)	Exemplo tomado numa mesma série de Paisagens	Unidades elementares				
			Relevo (1)	Clima (2)	Botânica	Biogeografia	Unidade trabalhada pelo homem
Zona	G.I	Temperada		Zona		Bioma	Zona
Domínio	G.II	Cantábrico		Regional			Domínio Região
Região Natural	G. III-IV	Picos da Europa	Domínio estrutural		Andar Série		Quarteirão rural ou urbano
Geossistema	G. IV-V	Geossistema atlântico montanhês (calcário sombreado com faia higrófila a <i>Aspersula adorata</i> em “terra fusca”)	Região estrutural	Local		Zona equipotencial	
Geofácies	G. VI	Prado de ceifa com <i>Molínio-Arrhenatheretea</i> em solo lixiviado hidromórfico formado em depósito moráinico					Exploração ou quarteirão parcelado (pequena ilha ou cidade)
Geótopo	G. VII	“Lapiés”de dissolução com <i>Aspidium lonchitis</i> em microsolo úmido carbonatado em bolsas		Microclima		Biótopo Biocenosa	Parcela (casa em cidade)

Fonte: Adaptado de Bertrand (1972), Conforme: (1) Tricart, Cailleux e Viers; (2) Max Sorre; (3) Brunet

Os elementos climáticos e estruturais se enquadrariam nas unidades superiores (zona, domínio, região natural), enquanto os elementos biogeográficos e antrópicos nas inferiores (geossistema, geofácies, geótipos). O geossistema se encontra nas ordens inferiores, estabelecido entre a 4ª e a 5ª ordem de grandeza, compreendida entre alguns quilômetros a centenas de quilômetros quadrados, possibilitando a análise integrada da paisagem a partir de características distintas de relevo, clima, botânica, biogeografia e unidades valoradas pelo homem.

Desse modo, a paisagem/geossistema pode ser definida como uma unidade distinta e mensurável resultante da combinação de processos geológicos/geomorfológicos, dos padrões de organização dos organismos que resulta na composição de uma paisagem terrestre organizadas em arranjos estruturados em manchas (patches), corredores e matrizes.

Esse conceito é significativamente conivente para a aplicação em Geoprocessamento e SIG, por meio do mapeamento dos padrões estruturais, da análise das interações espaciais e do entendimento dos processos e das dinâmicas socioambientais na formação dos complexos paisagísticos permitem avaliar padrões de mudanças assim como de simular e modelar as tendências de evolução da Paisagem.

2.1.2 Mudanças de uso e cobertura da terra

Um dos efeitos mais marcantes das atividades humanas sobre o espaço geográfico são as mudanças nos padrões de cobertura da terra, cuja avaliação representa um dos principais elementos para o conhecimento do espaço. Como instrumento basilar para o desenvolvimento de políticas de planejamento ambiental e gestão do território, essas informações possibilitam identificar as relações entre os meios biofísico e socioeconômico e fornecer dados para diversos estudos como: previsões de safras, avaliação de cobertura florestal, escolha de áreas para a expansão agrícola e florestal, entre outros (Bolfe, 2010).

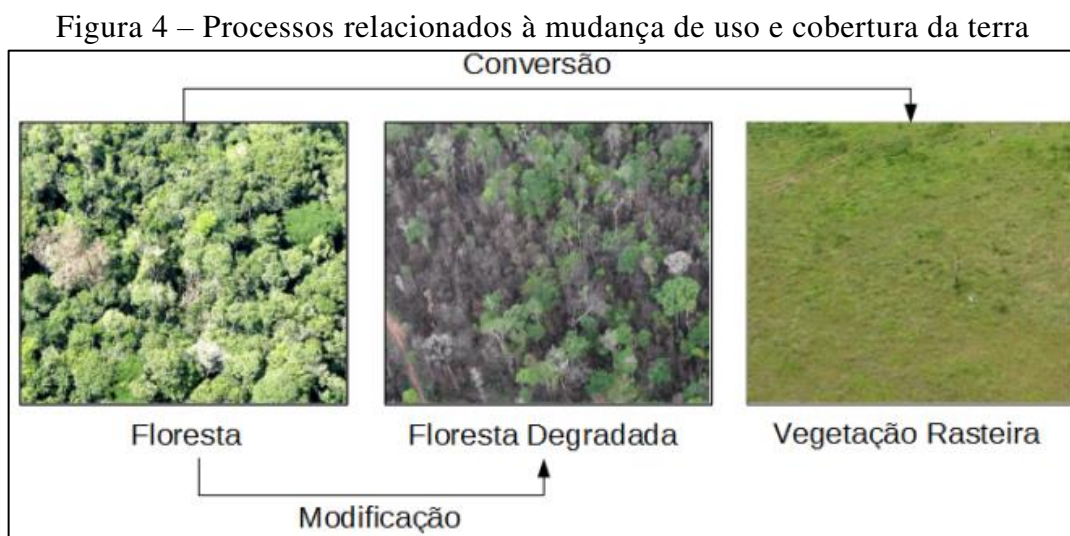
Consideradas por Meyer e Turner II (1992 p 8) como um dos campos das “dimensões humanas das mudanças ambientais globais, as mudanças de uso e cobertura da terra são processos não-lineares, complexos e significativamente dinâmicos²¹, principalmente pelo ritmo, alcance geográfico e impactos no âmbito global, regional e local que esses fenômenos tendem a ocasionar (Briassoulis, 2000; Côrtes; D’antona, 2014; Rodrigues, 2018).

Formado por dois termos que usualmente são empregados como sinônimos em grande parte dos levantamentos, possuem conotações diferentes, sendo fundamental estabelecer as diferenças entre eles (Meyer; Turner II, 1992; Alves, 2004).

Enquanto a palavra cobertura envolve características biofísicas, aspectos biológicos, geológicos e químicos e estruturais da superfície terrestre; o termo uso tem forte ligação sociológica e com as ciências humanas, relacionando-se às formas de manejo dos atributos biofísicos da superfície (cobertura), ou seja, as formas de utilização dos componentes que recobrem a superfície, mediante práticas sociais, culturais e econômicas, como pastagem, culturas agrícolas, recreação, proteção, reflorestamento (Lambin *et al.*, 2001; Xaud, 2013).

Desse modo, o que a imagem de sensoriamento remoto capta é a interação entre os elementos biofísicos e a radiação eletromagnética, - os elementos que recobrem a superfície imageada – que a partir cognição humana é direcionada sob as formas de uso determinado principalmente pelas dinâmicas socioespaciais, culturais e políticas (Brito *et al.*, 2013).

Meyer e Tunner (1992) consideram dois processos essenciais para se entender a dinâmica de uso e cobertura da terra denominados conversão e modificação, que, apesar das terminologias frequentemente serem vistas como sinônimas, representam processos diferentes que ocorrem na superfície terrestre, conforme demonstra-se na figura 4.



Fonte: Azeredo, 2017

A conversão é a transformação de uma classe para outra classe, ocorrendo a mudança dos padrões biofísicos, químicos e ecológicos da classe - floresta para agricultura -. Por outro lado, a modificação não ocorre o processo de mudança da condição biofísica de

²¹ As mudanças de uso e cobertura da terra podem estar associadas a fatores biofísicos (naturais) e/ou socioeconômicos e culturais (antrópicos), sendo esses últimos como os principais fatores de mudanças

uma mesma classe²², ocorrendo sim a mudança em sua estrutura, - floresta que passou por processo de degradação (Azeredo, 2017).

Geist e Lambin (2002) consideram que as mudanças de uso e cobertura da terra, principalmente as de origem antrópicas, estão associadas a uma série de fatores que incluem aspectos econômicos, tecnológicos, culturais e demográficos, e podem ser diferenciados em imediatos e subjacentes.

Os fatores imediatos estão relacionados às ações físicas que agem sobre a cobertura da terra, sejam elas de origem natural ou antrópica no âmbito local, por exemplo: atividades de extração de madeira, agropecuária e construção de infraestruturas. Já os fatores subjacentes correspondem a processos indiretos e difusos, com ocorrência em geral no âmbito regional e global, e determinam contextos que influenciam os fatores imediatos, a exemplo das condições econômicas, sociais, políticas, tecnológicas, demográficas e culturais, que podem influenciar, de forma cíclica, novos contextos para a modificação dos fatores subjacentes.

Pode-se exemplificar, como condicionantes imediato e subjacente, as elevadas taxas de mudanças de cobertura e uso da terra observadas no Cerrado maranhense, em especial a mesorregião Sul Maranhense (INPE, 2020), os processos locais de expansão da agropecuária, na qual pode-se destacar o aumento da demanda por commodities agrícolas (fator econômico) que, em associação com a baixa taxa de proteção e uma política ambiental (fatores políticos), possibilitaram a expansão da fronteira agrícola no Cerrado na área.

2.1.3 Escolas corologias e locacionais e a inserção das análises de uso e cobertura da terra no âmbito geográfico

Apresentar um marco teórico e epistemológico sistematizado, no qual as análises sobre mudanças de uso e cobertura da terra se encaixem, é uma tarefa complexa, principalmente pelo caráter interdisciplinar que o tema possui, sendo objeto de análise de vários ramos do conhecimento.

Apesar do tema não possuir uma base teórico-metodológica sistematizada dentro da ciência geográfica, as pesquisas relacionadas às mudanças de uso e cobertura da terra sempre estiveram inseridas nas discussões desse campo, sobretudo por sua relevância no entendimento das mudanças que ocorrem no espaço geográfico, tendo em vista que as formas

²² Cabe destacar que uma única classe de cobertura da terra pode apresentar diversificadas formas de usos - exemplo uma área de floresta pode ser utilizada como unidade de conservação, turismo, corte seletivo), assim como o mesmo tipo de uso pode incluir diversas coberturas, - exemplo agricultura que pode englobar diferentes culturas como soja, cana, milho, pastagens etc.-

de uso da terra representam diretamente as relações entre os aspectos sociais com o ambiente, suas causas e suas consequências (Rodrigues, 2018).

Na Geografia, as bases teórico-epistemológicas que podem fundamentar os estudos referentes à mudança de uso e cobertura da terra têm relação estreita com a evolução técnica e a produção cartográfica, fundamentadas no âmbito da análise espacial e amparadas nas escolas corológica e locacional²³ (Lemos, 2005; Ferreira, 2006).

A escola corológica ou da diferenciação espacial tem suas bases epistemológicas fundamentadas na escola francesa de Vidal de La Blache, na Antropogeografia germânica de Ratzel e no método regional de Hartshorne que estabeleceu os conceitos de lugar, região homogênea e espaço para a “integração e diferenciação espacial” (Ferreira, 2013).

Essa escola é moldada pela análise das inter-relações entre os fenômenos heterogêneos, que condicionam a distribuição desigual dos objetos sobre a superfície terrestre formando unidades homogêneas denominadas de “unidade-área” e cabia à Geografia diferenciá-las segundo suas características gerais e específicas, com objetivo de entender a distribuição dos elementos, integrando tanto os elementos naturais quanto as relações sociais.

A escola corológica fortaleceu a construção dos mapas regionais, produzidos para identificar e diferenciar áreas homogêneas. Conforme Ferreira (2013), na escola corológica a busca pelo aperfeiçoamento das técnicas cartográficas aprimorou os aspectos de descrição e representação, pois a concepção de espaço estava diretamente ligada ao mapeável, fundamental para desenvolvimento dos mapas de inventários regionais.

A segunda escola que contribuiu para o desenvolvimento das análises de uso e cobertura da terra na Geografia foi a escola Locacional. Ao contrário da escola corológica, a locacional pautou-se nos aspectos da localização para explicar os padrões de distribuição dos objetos e fenômenos, o pensamento geográfico ganha ênfase no “onde”, indicando os conceitos de “posição”, “situação”, “localização”, “distribuição” ou “disposição”, pois essas condições definem as relações espaciais, ou seja, localizar é relacionar (Ferreira, 2013).

Do ponto de vista epistemológico, o desenvolvimento dessa escola está associado aos paradigmas de quantificação da Geografia oriundos do método hipotético dedutivo, que passou a reger as teorias espaciais por meio do uso de leis gerais para o estudo dos padrões de distribuição espacial dos fenômenos, conforme concepções matemática e estatística, surgem, aqui, os conceitos de autocorrelação espacial, difusão espacial, dependência espacial e vizinhança (Câmara; Monteiro; Medeiros, 2003).

²³ Segundo Ferreira (2006), um dos principais estudiosos no âmbito da análise espacial é Robert David Sack.

Pontua-se que o desenvolvimento técnico-científico possibilitou avanços na área da produção cartográfica nesse período, com destaque para a melhoria dos padrões de elaboração de mapas, para o desenvolvimento dos sistemas de informações geográficas que viabilizou novos métodos de representação do espaço, superando os modelos regionais da escola corológica, assim como para as superfícies espaciais (redes e malhas regulares), que favoreceram o desenvolvimento da cartografia automática (digital) e expandiram o uso de mapas e análises geográficas.

Ferreira (2006) afirma que a escola locacional ou espacial prioriza as relações entre os padrões e os arranjos espaciais dos objetos, que resultam da atuação dos fenômenos sobre a superfície. Para essa escola, mais importante que a regionalização é o padrão geométrico (formas) e a posição dos objetos no espaço, que são aspectos que não devem ser considerados isoladamente, mas a partir das características de distância e proximidade que definem a dependência espacial dos objetos.

Outro processo que tem forte relação com o desenvolvimento da escola locacional é a difusão espacial (Hägerstrand, 1953), que evidencia a ocorrência de processos e regularidades espaciais e temporais conforme efeitos de vizinhança, que é fundamental para o efeito de propagação de um fenômeno em escala local e regional, a exemplo da expansão da agropecuária como um fenômeno espacial.

Para que não seja considerada um simples movimento no espaço, a difusão espacial deve apresentar algumas condições: i) surgir em um local apto ao deslocamento; ii) a área deve ter capacidade de torna-se foco de emissão; iii) existência de um meio de recepção favorável a propagação rápida; iv) força de alastramento rápido.

Para os levantamentos do uso e da cobertura da terra, o surgimento do sensoriamento remoto, que em associação aos sistemas de informações geográficas, tem contribuído consideravelmente para a ampliação de estudo da temática no âmbito da escola locacional, gerando novos conhecimentos do território e das variáveis atuantes na dinâmica de transformação do espaço produzido pelo homem, assim como de pesquisas associadas à cartografia prospectiva em SIG, que buscam analisar e simular arranjos espaciais futuros a partir de observações presentes e pretéritas.

Nesse aspecto destaca-se os pressupostos teóricos espaciais da escola locacional resultantes dos conceitos de *sítio e situação* que formulou as bases para a arquitetura dos sistemas de informações geográficas, a partir da ideia de matriz geográfica, bem como por possuírem papel relevante nos modelos de análise espacial por possibilitarem as funções de

consultas a partir da utilização de mapas, a exemplo das análises de mudanças, expansão e probabilidade de transição da cobertura da terra.

2.1.4 Sítio, Situação e a Matriz Geográfica na análise de uso e cobertura da terra

O sítio é intimamente ligado às características corológicas do espaço, similar à noção de área geográfica homogênea – unidade área -, na qual agregam traços temáticos e atribuem ao lugar condições de unidade e de especificidade, podendo ser comparado verticalmente a outras áreas a partir do modelo de diferenciação areal apresentado por Hartshorne (Ferreira, 2013).

Já a situação é um conceito horizontal que possibilita a análise da interação regional e da dependência entre os lugares, estando diretamente associada às condições de vizinhança, contiguidade e distância, constituindo-se em um conceito espacial pleno, tarefa primordial da análise do espaço e base integradora do processo de elaboração dos sistemas de informações geográficas -SIGs (Bolfé, 2010; Ferreira, 2013).

Ressalta-se que a situação representa as propriedades geométricas e, na análise de uso e cobertura da terra, pode ser associada aos padrões de atributos (tipos de cobertura e uso), localização e temporalidade (padrão de mudanças ao longo do tempo). Ferreira (2013 p. 46) afirma que “todo sítio dá substância a um lugar e a situação dá uma instância a este mesmo lugar, sendo a instância a informação espacial absoluta de cada lugar ou a posição relativa entre lugares referenciada cartograficamente em um plano”.

A partir dos conceitos de sítio e situação, Barry (1969 apud Ferreira, 2013) formulou o desenho da matriz geográfica (Figura 5), uma representação retangular formada por linhas que representam um conjunto de características de um lugar (sítio), e colunas (situação) que representam a diversidade de lugares nos quais tais características foram observadas.

Figura 5 – Matriz geográfica.

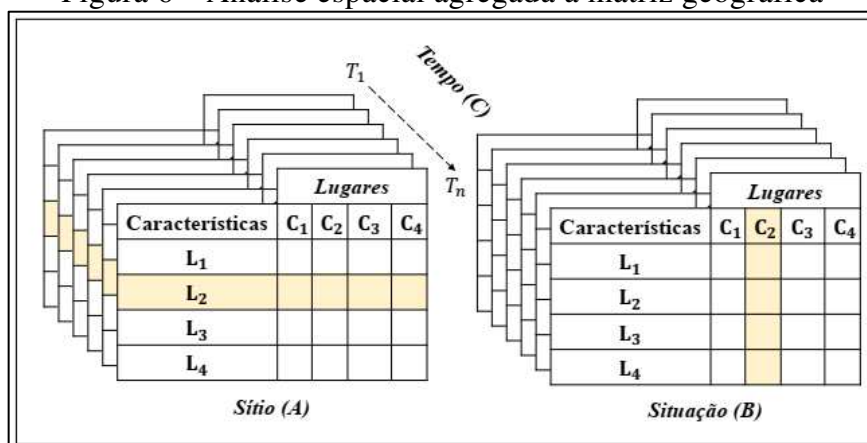
Características	Lugares	
Linhas i	Coluna j	
		Célula ij
	Caixa ou submatriz	

Fonte: adaptado de Berry (1964).

A interseção entre linhas e colunas forma um conjunto de células que resulta em um “fato geográfico”, permitindo, assim, a composição de um modelo de representação espacial que pode englobar desde pequenas áreas até setores de grandes dimensões (Berry, 1964; Buzai; Baxendale, 2006).

Uma terceira variável, o tempo, pode ser agregada à matriz, sendo ideal para o a análise de mudanças que ocorrem ao longo do tempo, como é o caso do uso e cobertura da terra. Desse modo a matriz geográfica constitui um modelo de análise espacial propriamente dito, pois envolve os padrões e a variação espacial, que podem ser cartograficamente representadas e possibilitam um conjunto de análises associadas às interações entre linhas, colunas e suas mudanças no tempo (figura 6).

Figura 6 – Análise espacial agregada à matriz geográfica



Fonte: Ferreira (2013)

A inserção da variável tempo possibilita à matriz ultrapassar o modelo estático de análise dos fatos geográficos ao permitir nova forma de conceber e observar os padrões espaciais, e confere uma visão sinótica e temporal dos fenômenos espaciais, sendo ideal para o monitoramento das mudanças de uso e cobertura da terra, uma vez que a composição da matriz geográfica propicia não apenas monitorar, mas também modelar suas mudanças a partir da construção dos chamados mapas dinâmicos, e a possibilidade da realização de consultas espaciais, sendo essa i) atributos; ii) por localização e iii) correspondência espacial (Ferreira, 2013).

Outra importante contribuição da matriz geográfica é a possibilidade da realização de consultas espaciais em ambiente SIG, que podem auxiliar na produção de informações sobre os fenômenos que ocorrem no espaço geográfico, a exemplo das mudanças de uso e cobertura da terra. Entre essas análises destacam-se a detecção de mudanças, a construção da matriz de transição, das perdas, ganhos e manutenção, que podem ser empregados em análise de modelagem dinâmica espacial que resultam em *mapas prospectivos*, relevante ferramenta para a geração de informações associadas a processos de mudanças de uso e cobertura da terra.

2.2 Modelagem dinâmica espacial de uso e cobertura da terra

2.2.1 Modelagem Dinâmica

A evolução computacional, a melhoria dos sistemas de informações geográficas-SIGs e a dinamização de dados espaciais gratuitamente distribuídos potencializaram as formas de representação espacial, sendo o mapa é o principal modelo de representação dos fenômenos que ocorrem no espaço (Pedrosa; Câmara, 2007).

Contudo, esse tipo de representação não enfatiza de maneira significativa os processos dinâmicos que correm na natureza, fator que gerou grande preocupação da ciência

da informação espacial, e formulou as bases para o desenvolvimento dos modelos dinâmicos (Burrough, 1994; Soares-Filho, 1998b).

Para Pedrosa e Câmara (2007), a criação de modelos espaciais dinâmicos tem como objetivo superar as limitações das representações estáticas e bidimensional dos fenômenos que são representados em mapas. Desse modo, a modelagem dinâmica espacial é uma técnica de elaboração cartográfica pautada no desenvolvimento de mapas dinâmicos, com intuito de representar processos espaço-temporais, como mudanças de uso e cobertura da terra, desmatamento, dispersão de indivíduos, urbanização, e outros fenômenos que ocorrem no espaço geográfico (Sayão, 2001; Bueno, 2018).

Burrough (1994) considera um modelo dinâmico como uma representação matemática de algum processo ou fenômeno do mundo real, ou seja, um modelo dinâmico espacial pode ser considerado uma abstração das características de sítio e situação. Portanto, pode-se considerar que os modelos dinâmicos são representações que envolvem padrões locais do sítio (onde), da situação (o que), com adição da variável tempo (quando), derivando diretamente da matriz geográfica de Barry.

Pavão (2017) pondera que, apesar de um modelo estar relacionado muitas vezes ao seu nível de abstração, exige constante aperfeiçoamento, pois, à medida que surgem novas informações ou perspectivas da realidade, é necessário que o modelo também consiga absorver e considerar essas informações. A autora destaca também que os modelos, por constituírem ponte entre os níveis de observação concretos e os teóricos, têm sua utilização vinculada à verificação de teorias.

Os modelos são tentativas de generalização dos fenômenos utilizando expressões controláveis pelo ser humano, e derivam da necessidade humana de entender a realidade, sendo considerados representações simplificadas e intangíveis do mundo (Pedrosa; Câmara, 2007).

Sobre o processo de construção de um modelo dinâmico, Sayao (2001) enfatiza que:

De certa forma, um modelo é uma criação cultural, um “mentefato”, destinada a representar uma realidade, ou algum de seus aspectos, a fim de torná-los descritíveis qualitativamente e quantitativamente e, algumas vezes, observáveis. A existência de modelos jaz na impossibilidade cultural de descrever objetos com perfeição, esgotando as possibilidades de sua observação. Não sendo transparente para o homem, o mundo se lhe apresenta como um permanente desafio à sua descrição. Essa limitação filosófica de percepção é que permite e exige o aparecimento de modelos (Sayão, 2001 p. 2).

Soares Filho *et al.* (1998a) consideram os modelos espaciais ou modelos de paisagem (modelos espaço-temporais) uma classe especial de modelos de simulação, pois simulam mudanças dos atributos do espaço geográfico e possibilitam o entendimento dos mecanismos causais que atuam

no desenvolvimento dos diferentes sistemas, permitindo assim determinar como eles tendem a evoluir, testando hipóteses e possíveis trajetórias de mudanças espaciais. Pedrosa e Câmara (2007, p. 10), por sua vez, destacam que modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo, e devem responder as seguintes questões:

Quais variáveis ambientais e culturais contribuem para explicar o fenômeno e quais são os processos ecológicos e sócio-econômicos existentes por trás do fenômeno? Como o processo evolui? Onde ocorrem os fenômenos? Estas questões-chaves podem ser identificadas como as clássicas “Porque”, “Quando” e “Onde”. Um modelo que responde a estas questões é capaz de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporal e espacial (Pedrosa; Câmara, 2004, p. 10).

Chorley (1967) conceitua os modelos espaço-temporais como tentativas simplificadas da representação da realidade, que supostamente apresentam, de forma generalizada, características ou relações importantes entre fenômenos que ocorrem na natureza, sendo uma ferramenta para a representação formal de alguma teoria ou sistema de interesse e utiliza variáveis de interesse e descarta variáveis que não são relevantes para o entendimento do fenômeno.

É importante destacar que os modelos não possuem capacidade de prever o futuro, o que eles possibilitam, com um determinado nível de confiança, é a indicação do comportamento de um fenômeno conforme parâmetros ou características preestabelecidas ou padrões já conhecidos. Soares-Filho (1998a) chama a atenção para o termo “simulação” que aparece frequentemente relacionado à modelagem, podendo ser descrito como o processo de elaboração de um modelo de um sistema real (ou hipotético) e a condução de experimentos com a finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação.

Assim, o propósito da modelagem dinâmica é simular mudanças espaço-temporais atreladas a um território geográfico, e sua concepção permite o entendimento dos mecanismos influentes que determinam a função de mudança e, com isso, avaliar como um sistema possivelmente pode evoluir diante de um conjunto de circunstâncias definidas pelo modelador. O uso de SIG em modelagem espacial possibilita explorar e avaliar cenários alternativos, podendo assim determinar como eles evoluem diante de diferentes quadros socioeconômicos, políticos e ambientais. Desse modo, nota-se que:

Uma maneira conveniente de se pensar sobre um modelo espacial consiste em imaginar uma paisagem composta por uma variedade de arranjos de elementos de paisagem – os quais representam ecossistemas ou classes de cobertura e uso do solo – sobrepostos a uma grade ou matriz, sistema de representação 2D conhecido como raster ou matricial. Elementos de paisagem passam a ser representados por pixels ou células com o mesmo valor em uma única camada de informação (Soares-Filho *et al.*, 2007, p. 3).

Pedrosa e Câmara (2003) ressaltam que os processos de modelização realizados em SIG são desenvolvidos a partir de suposições preestabelecidas quanto a homogeneidade, uniformidade e universalidade das propriedades de seus principais componentes, que incluem o espaço e as relações espaciais entre os objetos geográficos (vizinhança, proximidade, pertinência), o tempo e o próprio modelo, que descreve como os fenômenos tendem a se relacionar com objetivo de proporcionar a construção de cenários para identificar o comportamento de certo fenômeno.

A construção de modelos prospectivos de uso e cobertura da terra é baseada na aplicação de modelos dinâmicos espaço-temporais. Veldkamp e Verburg (2004) destacam que os modelos de mudança no uso da terra são ferramentas para compreender as causas e consequências da dinâmica do uso da terra. A análise de cenários com modelos de uso da terra pode apoiar o planejamento e a política de uso da terra

Tais tipos de modelos possibilitam a representação dos fenômenos espaciais por meio computacional e buscam simular processos de transição e mudanças a partir da integração entre o fenômeno investigado (exemplo: expansão do desmatamento) e os fatores condicionantes para a ocorrência do fenômeno (fatores que interagem para a ocorrência do fenômeno, como a proximidade de uma estrada) no espaço e no tempo.

Encontra-se em Soares Filho (1998b) que, modelos dinâmicos são mais sensíveis do que modelos empíricos e estatísticos para prever mudanças futuras no uso da terra. Ainda conforme o autor, um modelo de dinâmica espacial descreve as mudanças nos padrões espaciais em um tempo t para um novo padrão espacial em um tempo $t+m$, conforme a equação 1:

$$X_{t+m} = f(X_t, Y_t) \quad (\text{Equação 1})$$

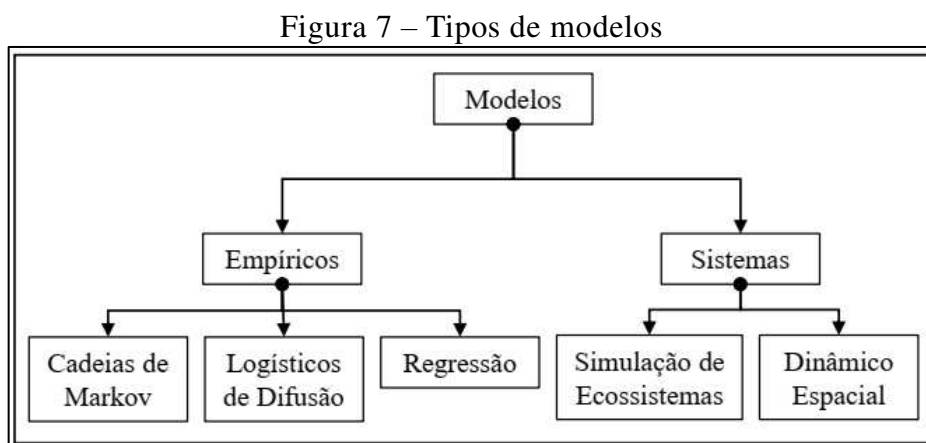
Na equação 1, X_t corresponde ao padrão espacial no tempo t ; Y_t é um vetor de variáveis que podem afetar a transição (variáveis correlacionadas, a exemplo de políticas públicas, infraestrutura etc.), mostrando que os componentes espaço e tempo estão diretamente conectados, não podendo ser considerados partes independentes, pois o processo Y no tempo t controla os processos no tempo $t+m$, onde são estabelecidos de correlação espacial, e resultam em uma probabilidade de ocorrência de novos eventos (Soares-Filho, 1998).

Soares-Filho *et al.* (2007) pontuam que, dentro dos seus diversos propósitos, os modelos espaciais dinâmicos têm se tornado um importante instrumento de auxílio ao ordenamento territorial, tendo em vista que qualquer planejamento regional ou estratégia de conservação ambiental que não leve em conta o fator tempo está fadado ao insucesso.

Os modelos espaciais têm sido usados em diversas áreas e com diferentes propósitos, tal como tendência de desmatamento (Soares Filho *et al.*, 2007; Aguiar; Câmara e Escada, 2007; Brito, 2018), mudanças de uso da terra (Pavão, 2017; Ibarra-Bonilla, 2021; Machado, 2022), dinâmicas urbanas (Almeida, 2002; Bueno, 2018), entre várias outras aplicações, e buscam simular processos de expansão, fragmentação ou outras variáveis em diversos ambientes, sob diferentes perspectivas.

2.2.2 Tipos de Modelos

Os modelos podem ser classificados segundo suas tipologias e aplicações, em função de suas ideologias, áreas de conhecimento ou ainda conforme os objetivos aos quais estão sendo aplicados. Segundo Sayão (2001), os modelos podem ser classificados em uma série interminável de tipos. E outro ponto destacado pelo autor é que devido à ambiguidade é complexo definir as tipologias de modelos. Pedrosa e Câmara (2007) apresentam uma classificação onde os modelos podem ser empíricos²⁴ ou de sistemas, conforme representado na figura 7.



Fonte: Pedrosa e Câmara (2007)

Nota-se que o primeiro grupo focaliza os relacionamentos entre as variáveis que fazem parte do modelo a partir da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro; já o segundo grupo são formulações matemáticas de processos complexos que interagem entre si e entre todos os componentes do sistema para gerar informação (Pedrosa; Câmara, 2007).

²⁴ Os modelos empíricos são constituídos de três características: configuração de entrada, funções de mudanças e configuração de saída. A configuração de entrada consiste na inserção de dados históricos, como as séries temporais, que é submetida às funções de mudanças, as quais descrevem o estado inicial e final do modelo. Elas são o estado de modelagem em si, e podem envolver desde simples equações diferenciais, até robustas tarefas de tomadas de decisão. Já a configuração de saída é o resultado da aplicação das funções de mudanças, e resulta no mapa simulado (Pedrosa; Câmara, 2007).

Outra classificação é proposta por Sayão (2001) que divide os modelos em análogos ou de escala, modelos conceituais e modelos matemáticos. Os modelos análogos correspondem a tentativas de reprodução dos fenômenos, a partir de uma reprodução reduzida do fenômeno original, ou seja, a unidade de medida do modelo análogo tem relação direta com o valor no mundo real. Um exemplo clássico de modelos análogos são os mapas e maquetes, que correspondem a representações gráficas da realidade, segundo uma escala espacial de representação (Benedetti, 2010).

Os modelos conceituais representam o processo do mundo real a partir de diagramas, expressando rotinas de processamento utilizando fluxogramas, e retratam passos sequenciais interrelacionados. Esses modelos de representação funcionam em ambientes específicos, a exemplo de processos de gestão em sistemas de zoneamento ou de administração. Já os modelos matemáticos expressam fenômenos a partir da aplicação de fórmulas numéricas, e necessitam de elevado grau de entendimento do fenômeno simulado, haja vista que eles dificilmente manifestam condições subjetivas da realidade (Pavão, 2017).

Em Sayão (2001) encontra-se ainda outra classificação na qual identifica os modelos em descritivos e normativos. Os modelos *descritivos* têm como características demonstrar apenas o funcionamento de um sistema, centrando-se nos aspectos de equilíbrio estrutural (modelos estáticos); ou que priorizam as características temporais nos processos de desenvolvimento dos fenômenos (dinâmicos). Já os modelos *normativos* necessitam de certas condições preestabelecidas para que sejam implementados.

Christofolletti (1999) considera também os modelos preditivos que são construídos a partir de imagens de sistemas, matrizes de correlações entre os elementos de um sistema espacial, e esses fatores promovem a sua evolução ou mudança quando se modificam alguns parâmetros, isto é, certas condições de entrada e valores das variáveis de seus elementos e das relações; e modelos gráficos que compõem estruturas, resultando na existência de tipos recorrentes e, localmente, de arranjos espaciais determinados.

Conforme se observa em Briassoulis (2000), os modelos também podem diferenciados segundo suas características metodológicas e funcionais, sendo estatísticos ou econométricos; modelos de interação espacial; modelos de otimização (que incluem programação linear, dinâmica, hierárquica e não-linear, assim como modelos de maximização de utilidades e modelos multicritérios de tomada de decisão); modelos integrados (gravidade, simulação e de entrada-saída); modelos baseados em ciências naturais; modelos baseados em GIS e em cadeias Markovianas, e de autômatos celulares, principais modelos de transição e mudança de uso da terra (Benedetti, 2010; Pavão, 2017).

Tendo em vista que os modelos são representações dos fenômenos espaciais, Berry (1995 apud Pavão, 2017) considera duas categorias: os modelos estruturais que têm como foco a composição e a construção de componentes, tais como objetos e ações. Os objetos são considerados entidades estáticas, e têm como característica a representação visual que inclui escala, bidimensionalidade ou tridimensionalidade e representação simbólica e as ações são estruturas dinâmicas que se apresentam sob forma de movimento, focalizando as relações espaço-temporais dos objetos, e suas características envolvem períodos temporais, detecção de mudanças, estatísticas de transições e animação.

Já os modelos relacionais representam os fenômenos de forma integrada, ou seja, apesar de possuírem características individuais, relacionam-se entre si de maneira natural, o que possibilita uma representação simples dos dados em esquema e instância, ideal para reprodução de fenômenos espaciais integrados, principalmente em gerenciadores de banco de dados espaciais relacionais (Macário; Baldo, 2005).

Segundo Kawashima (2015), nos últimos anos ocorreu a elaboração de um grande conjunto de modelos voltados a predizer ou explorar possíveis trajetórias de mudanças no uso e cobertura da terra. Ainda conforme a autora, a literatura apresenta um número considerável desses modelos, nos quais se destacam três tipologias: os modelos empíricos e estatísticos, a exemplo dos modelos baseados na Cadeia de Markov (Silva; Bacani, 2018; Purwanto *et al.* 2023) e os modelos de regressão (Lesschen *et al.*, 2005); os modelos dinâmicos, tais como o modelo dos Autômatos Celulares (CA) (Bacani; Vick, 2019) e modelos baseados em agente (Fan; Bravo; Collischonn, 2016); e os modelos integrados, como o modelo Conversão do Uso da Terra e seus efeitos (*Conversion of Land Use and its Effects* - CLUE) (Demarchi, 2020).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Partindo da premissa que ocorreram significativas mudanças de uso e cobertura da terra da área estudada, principalmente pela expansão da agropecuária sobre áreas de vegetação natural, serão apresentadas as técnicas e rotinas de processamento digital de imagens para a classificação, mapeamento e simulação do uso e da cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense, seguindo critérios descritos em Soares-Filho (1998), Escada (2003), IBGE (2013), Florenzano (2011), Andrade *et al.* (2016), Pereira *et al.* (2021).

Para melhor compreensão das tarefas executadas para o alcance dos objetivos, os procedimentos metodológicos encontram-se divididos em duas etapas. Na primeira, serão apresentadas as rotinas de processamento de imagem executadas para o mapeamento automático do uso e da cobertura da terra; a segunda etapa correspondeu a todas as tarefas realizadas para a criação dos cenários de perda da cobertura vegetal natural a partir do uso de autômatos celulares e pesos e evidências.

3.1 Levantamento bibliográfico

Realizou-se a seleção e a organização de um conjunto de obras e autores que abordam os principais temas discutidos. Desse modo, sobre paisagem e geografia (Bertrand, 1972; Tricart, 2003; Passos, 2003; Bertrand, 2007); mudança de uso e cobertura da terra (Briassoulis, 2000; Meyer; Tunner II, 1992; Lambin *et al.*, 2001; Escada, 2003; Rodrigues, 2018); modelagem, simulação (Burroughs, 1996; Soares Filho, 1998a; Sayão, 2001; Aguiar; Câmara e Escada, 2007; Pavão, 2017).

A respeito de Cerrado, políticas públicas e expansão agrícola (Oliveira, 2002; Klink; Machado, 2005; Ribeiro; Walter, 2008; Inocêncio, 2010; Sano *et al.*, 2009; Sano *et al.*, 2022). E no que concerne ao processo de ocupação, expansão agrícola e mudanças de uso e cobertura da terra no sul do Maranhão (Cabral, 1992; Trovão, 2008; Alves, 2006; Ferreira, 2008a; Santos, 2011; Miranda, 2011; Cunha, 2015).

Essa etapa foi fundamental para a elaboração de um referencial teórico e constituiu uma das fases de aproximação do pesquisador com os principais conceitos e técnicas utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa, como uso e cobertura da terra, modelagem dinâmica espacial, importantes para se entender a dinâmica e os processos que atuam nas mudanças de uso e cobertura da terra para a área.

3.2 Base de dados

3.2.1 Dados matriciais

- ✓ Imagens Landsat 5, sensor TM, cenas; bandas espectrais 1, 2, 3 (comprimento de onda do visível) e 4, 5 e 7 (infravermelho); resolução espacial de 30 metros e resolução radiométrica de 8 bits.
- ✓ Imagens Landsat 8, sensor OLI, cenas 220/64; 220/65; 221/64 221/65; 221/66; 221/67; 222/64; 222/65, bandas 2, 3, 4 (comprimento de onda do visível) e 5, 6 e 7 (infravermelho); resolução espacial de 30 metros e resolução radiométrica 16 bits.
- ✓ Imagens de radar do projeto *Shuttle Radar Topography Mission*-SRTM, cenas S07w47; S07w48; S08w47; S08w48; S09w47; S09w48, com um arco de segundo que corresponde a uma resolução espacial de 30 metros, utilizado para a elaboração dos mapas clinográfico e hipsométrico da área de estudo.
- ✓ Imagens do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations CHIRPS*, resolução especial de 5 km, utilizadas para a caracterização e distribuição espacial da pluviosidade entre 1991 e 2020 (normal climatológica) da área.

As imagens Landsat 5 e Landsat 8²⁵ e SRTM utilizadas nas etapas de processamento de imagem foram obtidas gratuitamente no catálogo de imagens do Serviço de Levantamento Geológico Americano-USGS²⁶. As imagens Landsat foram selecionadas conforme o percentual de cobertura de nuvens, sendo utilizadas as imagens com até 5% por cena e até 0,5% de cobertura para o limite da área, sendo adquiridas apenas imagens entre os meses de agosto a outubro – período que corresponde à menor taxa de precipitação e, assim, menor incidência de nuvens –, e coincide com o período de pós-colheita e preparação do solo para cultivo.

3.2.2 Dados vetoriais

- ✓ Base cartográfica em formato vetorial (shapefile) referente a geologia, geomorfológica, clima, vegetação, hidrografia e cobertura vegetal resultantes do mapeamento sistêmico do Brasil, disponibilizada gratuitamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE na escala de 1:250.000 (IBGE, 2015).

²⁵ Apesar da existência de outros produtos, optou-se pelas imagens Landsat (TM e OLI) por possuírem qualidade relativa boa na resolução espectral, radiométrica e espacial, pela temporalidade de ocorrência, custo relativamente baixo e pela ocorrência de dados com baixa taxa de cobertura de nuvens que viabiliza seu uso para a área de estudo.

²⁶ Os referidos produtos podem ser acessados no website <https://earthexplorer.usgs.gov>.

- ✓ Malha viária do estado do Maranhão (federais, estaduais e municipais) em formato vetorial (shapefile), disponibilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes-DNIT, na escala de 1:100.000 (DNIT, 2015).
- ✓ Base de áreas especiais (unidades de conservação, territórios indígenas, áreas quilombolas) em formato vetorial (shapefile), disponibilizada pelo Ministério do Meio Ambiente-MMA, Incra e Funai (MMA, 2013), (INCRA, 2012), (FUNAI, 2012).
- ✓ Limites territoriais dos municípios brasileiros, em formato vetorial (shapefile) disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, com escala de 1:250.000.

3.2.3 Dados tabulares

- ✓ Base de distribuição de silos e armazéns²⁷, em formato tabular (csv) disponibilizada pela Companhia Nacional de Abastecimento (sem escala definida).

3.3 Processamento de dados topográficos e de precipitação

Para criação dos mapas de altimetria e clinografia (declividade de vertente) foram utilizadas imagens radar do *Shuttle Radar Topography Mission-SRTM*, disponibilizadas pela USGS (2013). As imagens SRTM passaram por processo de correção de pixels com erros (picos e/ou depressões) que surgem devidos a interferências que ocorrem durante o processo de aquisição e após seu processamento e distribuição.

Após a etapa de correção, foi realizada a extração das informações morfométricas de terreno (declividade e hipsometria), utilizando as ferramentas *análise de terreno*, implementadas no Qgis 3.16[®], onde se caracterizou os padrões de declividade em porcentagem e hipsometria em metros.

Os dados de declividade foram reclassificados seguindo critérios descritos em EMBRAPA (2013, p. 296), sendo esses planos (declividade variando entre 0 e 3%), suave ondulado (declividade entre 3 e 8%), ondulado (declividade entre 8 e 20%), forte ondulado (declividade entre 20 e 45%), montanhoso (declividade entre 45 e 75%) e escarpado (declividade superior a 45%).

Já a distribuição pluviométrica espacial da área, optou-se pelo uso de informações das imagens da *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations-CHIRPS*²⁸

²⁷ Os dados de armazenagem são disponibilizados em coordenadas geográficas pela CONAB e convertidos em dados espaciais pontuais em formato shp.

²⁸ Disponibilizados no site <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>.

desenvolvidas pela United State Geological Survey (USGS) e pela *Climate Hazards Group at the University of California*, Santa Barbara (UCSB), disponibilizadas em formato matricial (raster), na qual apresenta resolução espacial de 5 km, e são uma opção para utilização de dados de precipitação pluviométrica em áreas onde há má distribuição de estações meteorológicas com dados superficiais (Garcês Junior, 2020).

Para tanto, aplicou-se um conjunto de rotinas descritas em Garcês Junior (2022). Inicialmente, foi criado um conjunto de dez mil pontos mediante utilização da ferramenta *Random Points*, e os valores correspondentes de cada pixel da imagem foram integrados à tabela de atributos do arquivo de pontos pela ferramenta *point sample*. Para a interpolação espacial e estimativa do padrão de distribuição das chuvas, utilizou-se a técnica inverso da distância ponderada (*inverse distance weighting-IDW*²⁹), um método de interpolação multivariado usado para estimar valores desconhecidos a partir de valores conhecidos, conforme a equação 2 descrita em Ferreira (2014) e apresentada a seguir:

$$Z_o = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (\text{equação 2})$$

Conforme Ferreira (2014), o IDW é um interpolador de média ponderada baseado na distância entre pontos para estimar um novo valor para Z_o , que corresponde ao valor que se pretende interpolar. O z_i é o valor do ponto amostrado vizinho ao nó, segundo h_{ij} , que são as distâncias entre o nó da grade e z_i , e β : expoente de ponderação, n: número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

Para as validações dos valores de precipitação extraídas da CHIRPS, utilizou-se a correlação linear de Pearson, que infere o grau de compatibilidade entre duas variáveis, sendo os dados comparados aos valores de precipitação das normais climatológicas (1991-2020), das estações pluviométricas automáticas e convencionais de Balsas, Carolina e Alto Parnaíba, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) conforme a equação 3.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Equação 3})$$

²⁹ O IDW pode ser caracterizado como um interpolador tanto suavizante quanto exato, do tipo global, razoavelmente fiel aos dados amostrados, com rápida velocidade de processamento e que não estima valores do ponto vizinho amostrado, maiores ou menores que os quantitativos máximos e mínimos dos dados informados.

Onde n é número de pares na amostra, x é o valor da variável x , y o valor da variável y , $\bar{x}$ é a média dos valores de x ; $\bar{y}$ é a média de valores de y . Conforme Callegari-Jacques (2009), a correlação de Pearson é uma inferência estatística amostral que apresenta valores variando de -1 e 1, e seus resultados podem ser interpretados da seguinte forma: correlação nula ($r = 0$); fraca ($0 < r \leq 0,3$); moderada ($0 < r \leq 0,6$); forte ($0 < r \leq 0,9$); muito forte ($0 < r \leq 1,0$); perfeita ($r = 1$) (Garcês Junior, 2022).

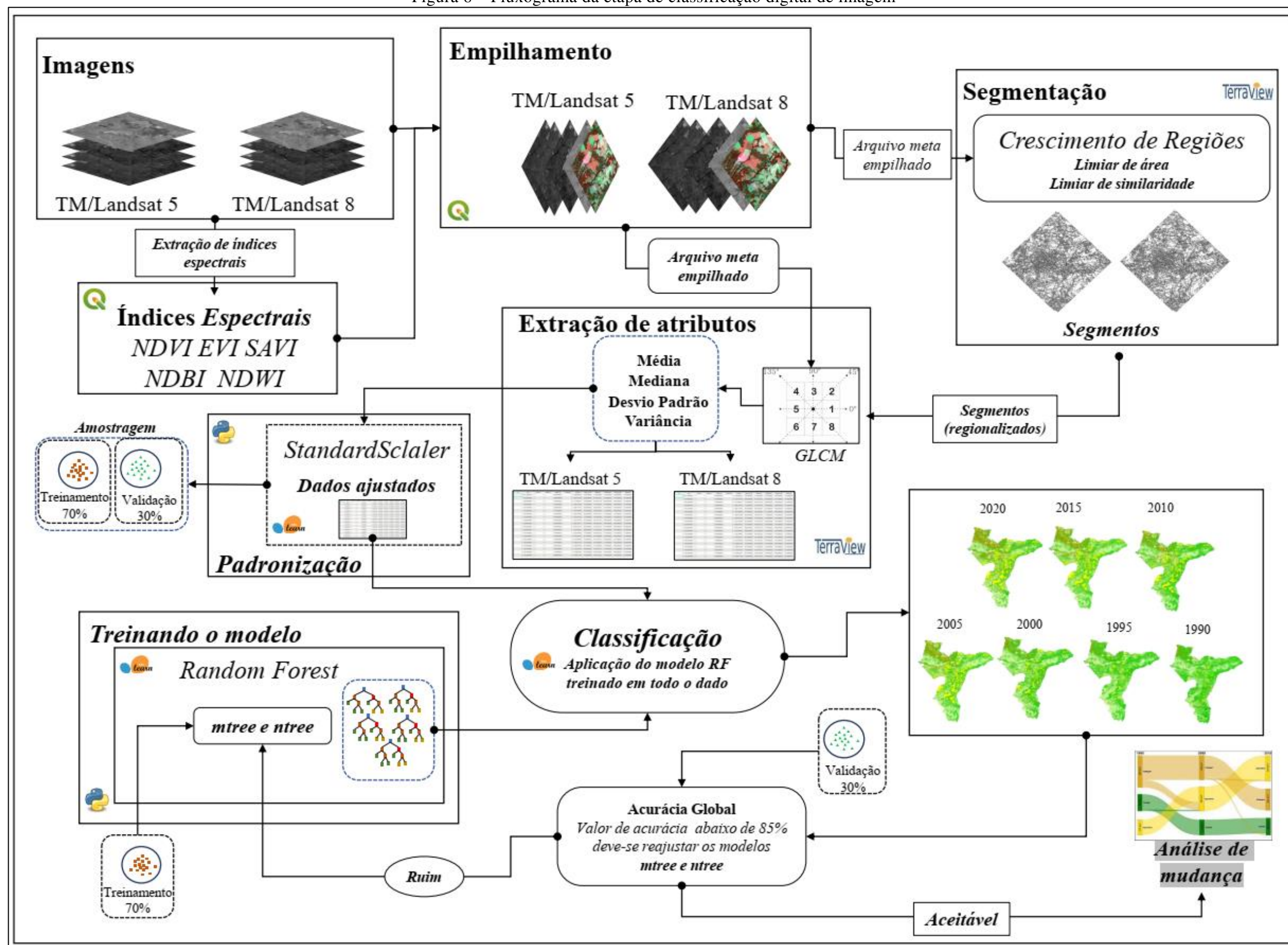
3.4 Classificações de uso e cobertura da terra da terra no Cerrado

Uma das propostas elencadas foi testar uma série de algoritmos para a classificação de dados regionalizados e atributos texturais derivados da matriz de coocorrência extraídos de imagens de média resolução (no caso específico desta pesquisa, imagens Landsat 5 e Landsat 8), com uma boa acurácia, para áreas que apresentem características espectrais próximas, haja vista que os atuais produtos disponíveis não correspondem em parte à realidade local³⁰.

Desse modo, apresentam-se aqui as rotinas de processamento de dados com objetivo de elaborar um modelo de classificação digital integrado para imagens de média resolução espacial, que pode também ser aplicável em áreas que possuam características espectrais semelhantes aos municípios que compõem a mesorregião Sul Maranhense (figura 8).

³⁰ Ao comparar o nível de exatidão dos produtos MAPBIOMAS coleção 7, encontrou-se uma taxa de exatidão de 68%, já a coleção 8 encontrou exatidão de 71 para o ano de 2020. O mapeamento do IBGE apresentou uma taxa de exatidão de 71% e o modelo de classificação elaborado pela ESRI foi de 69%, todos para o ano de 2020 (ano base).

Figura 8 – Fluxograma da etapa de classificação digital de imagem



Fonte: dados de pesquisa, 2024

3.4.1 Imagens Utilizadas

Para o mapeamento de uso e cobertura da terra foi utilizado um conjunto de imagens de satélites de média resolução espacial, oriundas do programa *Land Remote Sensing Satellite*. Formado por 9 satélites, dos quais três ainda se encontram em operação e com projeções para lançamento de mais uma constelação de satélite em 2030³¹, corresponde ao projeto de monitoramento e aquisição de informações ambientais por meio de satélites mais duradouro e bem-sucedido da atualidade (NASA/USGS, 2022).

O quadro 2 apresenta as características dos satélites do programa Landsat, porém será dado ênfase apenas aos satélites/sensores Landsat 5 e Landsat 8, uma vez que o mapeamento temático da cobertura da terra da mesorregião Sul Maranhense foi elaborado a partir de suas cenas.

Quadro 2 – cronologia do programa Landsat

Satélite	Lançamento	Situação	Sensor	Imageamento	Resolução temporal	Resolução Espacial
Landsat 1	23/07/1972	Inativo 06/01/1978	RBB/MMS	917 km	18 dias	80 m
Landsat 2	22/01/1975	Inativo 06/01/1982	RBB/MMS	917 km	18 dias	80 m
Landsat 3	05/03/1978	Inativo 31/03/1983	RBB/MMS	917 km	18 dias	80 m
Landsat 4	16/03/1982	Inativo (1993)	MMS/TM	917 km	16 dias	30 m
Landsat 5*	01/03/1984	Inativo 2011	MMS/TM	705 km	16 dias	30/120 m
Landsat 6	05/10/1993	Inativo 05/10/1993	ETM+	705 km	16 dias	30 m
Landsat 7	15/04/1999	Ativo	ETM+	705 km	16 dias	30 m
Landsat 8*	11/02/2013	Ativo	OLI/TIRS	705 km	16 dias	30/60 m
Landsat 9	27/11/2021	Ativo	OLI-2/TIRS-2	705 km	16 dias	30 m

*Correspondem as características das imagens utilizadas no processo de mapeamento de uso e cobertura da terra elaborados nessa pesquisa.

Fonte: Adaptado de USGS (2022)

31 Landsat Next – às vezes referido como Landsat 10 – é uma constelação planejada de três satélites superespectrais na continuação da série Landsat. E fornecerá mais que o dobro de bandas espectrais, com uma resolução melhorada, e cobertura repetida do Landsat 8 e Landsat 9 combinados. A missão é uma colaboração entre a NASA (National Aeronautics and Space Administration) e o USGS (United States Geological Survey), com o objetivo de ampliar a capacidade de detectar e caracterizar quantitativamente mudanças na superfície terrestre global, em uma escala onde as mudanças naturais e induzidas pelo homem e as causas das mudanças na superfície terrestre podem ser detectadas e diferenciadas.

O Landsat 5 operava com o sensor TM, que capta respostas espectrais de sete bandas espectrais (três na região do visível, uma na região do infravermelho próximo, dois no infravermelho médio e uma banda no infravermelho termal) (quadro 3), com exceção do infravermelho termal que apresenta 120 metros de resolução espacial, todas as bandas apresentam pixel de 30 metros, possui radiometria de 256 níveis de cinzas (8 bits) (USGS, 2013).

Quadro 3 – Características do Landsat 5

Sensor	Banda*	Comprimento de onda	Resolução espacial	Área imageada	Resolução radiométrica
TM	Azl – B1	0,45 – 0,52 μm	30 m	185 km	8 bits
	Ver – B2	0,50 – 0,60 μm			
	Vml – B3	0,63 – 0,60 μm			
	IVP - B4	0,76 – 0,90 μm			
	IVM I – B5	1,55 – 1,75 μm			
	IVM II – B7	2,08 – 2,35 μm			
	Trm - B6	10,4 – 12,5 μm	120 m		

*Azl-comprimento de onda na faixa do azul, ver- comprimento de onda na faixa do verde, vml-comprimento de onda na faixa do vermelho, ivp-comprimento de onda no infravermelho próximo, ivm I e IVM II-comprimento de onda no infravermelho médio, trm-faixa do termal

Fonte: Adaptado de USGS (2022)

O satélite Landsat 8³² (quadro 4) possui órbita de 705 km e ângulo de inclinação de 98,2° e cobertura de imageamento de tamanho aproximado de 170 km norte-sul por 183 km a leste-oeste, opera com dois instrumentos imagiadores, o Operational Land Imager (OLI) e o Termal Infrared Sensor (TIRS). O sensor OLI captura informações em nove regiões do espectro eletromagnético, já o TIRS possui duas bandas nas frequências do termal, voltadas para caracterizar as temperaturas de superfície de forma mais precisa (USGS, 2013)

³² A principal diferença do Landsat 8 para seus antecessores é a presença de uma banda pancromática com resolução espacial de 15 metros ideal para processos computacionais de reamostragem de pixel, a banda 1 (Aerossol ou Ultra Azul), útil para estudos costeiros e a banda 8 (Cirrus), útil para a detecção de nuvens (USGS, 2013)

Quadro 4 – Características do Landsat 8

Sensor	Banda	Comprimento de onda	Resolução espacial	Área imageada	Resolução radiométrica
OLI	Cos – B1	0,43 – 0,45	30 m	170 x 183 km	16 bits
	Azl-B2	0,45 – 0,51 μm			
	Ver-B3	0,53 – 0,59 μm			
	Vml-B4	0,64 – 0,67 μm			
	Ivp-B5	0,85 – 0,88 μm			
	Ivm I-B6	1,57 – 1,65 μm			
	Ivm II-B7	2,11 – 2,29 μm			
	Pan-B8	0,50 – 0,68	15 m		
	Cir-B9	1,36 – 1,38	30 m		
TIRS	Trm-B10	10,6 – 11,19 μm	100 m		
	Trm-B11	11,5 – 12,51	100 m		

cos – banda costeira, azl-comprimento de onda na faixa do azul, ver- comprimento de onda na faixa do verde, vml-comprimento de onda na faixa do vermelho, ivp-comprimento de onda no infravermelho próximo, ivm I e IVM II-comprimento de onda no infravermelho médio, trm-faixa do termal, pan – imagem pancromática, cir-imagens cirrus

Fonte: adaptado de Nasa/USGS (2013)

Para compor o banco de imagens, também foram calculados índices espectrais com objetivo de melhorar a separabilidade dos alvos, com cálculo dos seguintes índices de vegetação: NDVI (Rouse *et al.*, 1973); SAVI (Huete, 1988); EVI (Huete *et al.*, 2002); NDWI (Mcfeeters, 1996); NDBI (Zha *et al.*, 2003).

O índice de vegetação por diferença normalizada-NDVI (equação 4) indica o vigor vegetal e as diferenças de sensibilidade da variação de biomassa verde, conteúdo de clorofila e estresses hídricos, sendo um índice ideal para diferenciar os estratos de vegetação, com resultado representado em uma escala linear que varia de -1 a +1, onde valores negativos representam as nuvens, os próximos de zero representam o solo nu ou sem vegetação, e quanto mais próximo de 1 correspondem a ambientes com densidade de cobertura vegetal³³.

$$NDVI = \frac{P_{nir} - P_{red}}{P_{nir} + P_{red}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde p_{nir} e p_{red} as reflectâncias das regiões do infravermelho próximo e do vermelho.

³³ Conforme Bolfe (2010) por ser um índice resultante da combinação de duas bandas espectrais, ele resolve parcialmente os efeitos da presença dos constituintes atmosféricos e das perturbações radiométricas e geométricas, os efeitos gerados pelas variações do ângulo solar e do ângulo de visada dos sensores remotos são minimizados, tornando-se bastante útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação. Ainda conforme o autor, um ponto negativo atribuído ao NDVI que é a rápida saturação que ocorre a partir de determinadas densidades de desenvolvimento vegetativo, não ocorrendo variação mesmo aumentando a densidade de dossel

Já o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo-SAVI (equação 5), que é um índice que leva em consideração os efeitos do solo exposto nas imagens analisadas para ajuste do NDVI quando a superfície não está completamente coberta pela vegetação:

$$SAVI = \frac{(P_{nir} - P_{red}) * (1 + L)}{P_{nir} + P_{red} + L} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde P_{nir} é a refletância na faixa do infravermelho próximo; P_{red} corresponde a refletância na faixa do vermelho; L é fator de ajuste do solo. De acordo com Huete (1988), o fator L tem a função de minimizar a influência do brilho do solo nos dados espectrais, sendo seu valor variado conforme o padrão de densidade da vegetação, pretendo melhorar a resposta espectral da vegetação, principalmente em ambientes de baixo Índice de Área Foliar-IAF, sendo utilizado 1,0 para densidades baixas de vegetação, 0,5 para densidades médias de vegetação e 0,25 para densidades altas de vegetação.

Outro utilizado foi o Índice de Vegetação Melhorado (*Enhanced Vegetation Index-EVI*) (equação 6) foi criado para minimizar a saturação dos NDVI em regiões com alta densidade de vegetação e reduzir os efeitos do solo e da atmosfera, pois o EVI é mais sensível à estrutura do dossel, haja vista que esse índice apresenta maior sensibilidade em regiões com alta densidade de biomassa, por ter sido melhorado por meio da redução da influência da atmosfera e da dissociação do sinal de fundo do dossel vegetal.

$$EVI = 2.5 \frac{(P_{Nir} - P_{red})}{P_{nir} + 6P_{red} - 7,5P_{blue} + 1} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que EVI corresponde ao índice de vegetação melhorada; p_{nir} é refletância na faixa do infravermelho próximo; p = refletância na faixa do vermelho; L = fator de ajuste do solo.

O índice de água por diferença normalizada-NDWI (equação 7) é utilizado para destacar as características da água numa imagem de satélite, realçando corpos d'água presentes na área a partir da redução dos sinais de solo e vegetação em imagens. Já o NDBI (equação 8) possibilita a separação de pixels com baixo teor de cobertura vegetal, a partir da identificação de alvos com elevado brilho, ou seja, onde os maiores valores representem os pixels contidos em áreas construídas e os valores negativos representem pixels contidos em áreas não construídas, por exemplo superfícies com vegetação.

$$NDWI = \frac{(P_{green} - P_{nir})}{(P_{green} + P_{nir})} \quad (\text{Equação 7})$$

$$NDBI = \frac{(P_{red} - P_{nir})}{(P_{red} + P_{nir})} \quad (\text{Equação 8})$$

Os conjuntos de dados (bandas multiespectrais e os índices de vegetação derivados) foram empilhados em um arquivo de leitura única e exportados em formato *geotiff*, sendo elaboradas posteriormente as etapas de segmentação, extração e correção dos atributos, amostragem, classificação e validação.

3.4.2 Segmentação

A segmentação da imagem consiste em um processo de agrupamento de pixels que possuem características semelhantes -como os intervalos específicos de intensidade, textura ou cor- e formam regiões discretas, contíguas e que não se interceptam, constituindo, semanticamente, com objetivo de mudar a representação da imagem, fragmentando-as em regiões que podem ou não representar objetos³⁴ (Gonzalez; Woods, 2010; Zanotta; Ferreira; Zortea, 2019).

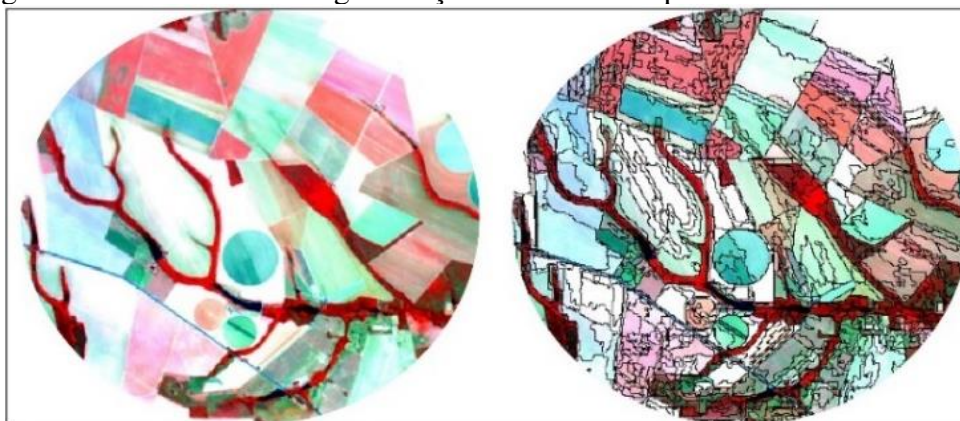
Para o processo de segmentação das imagens, foi utilizado o algoritmo de segmentação por crescimento de regiões-CR, considerada a mais tradicional técnica de segmentação de imagens, esse algoritmo realiza a agregação de pixels a partir de um pixel “semente” e, posteriormente, agrupa pixels vizinhos que têm propriedades similares, segundo valores predefinidos de similaridade e escala, produzindo um conjunto de aglomerados de pixels (Baatz; Schape, 2000; Zanotta; Ferreira; Zortea, 2019).

Cabe destacar que no algoritmo de segmentação por CR os limiares de similaridade e escala não possuem uma regra preestabelecida sendo definidos empiricamente até alcançar o melhor padrão visual no qual se consiga separar semanticamente os diferentes objetos segundo critérios do analista os (Körting *et al.*, 2013; Zanotta; Ferreira; Zortea, 2019).

Desse modo, foram realizados diferentes testes com tamanhos de áreas e de similaridade, sendo estabelecidos para todos os conjuntos de imagens a similaridade de 0.010 e área mínima de 12 pixels, que corresponde a uma área mínima de aproximadamente um hectare, como ilustrado na figura 9.

³⁴ A segmentação de imagens possibilitar a incorporação de informações espectrais, espaciais e de texturas dos objetos e, assim, melhorar significativamente a acurácia da classificação

Figura 9 – Resultado da segmentação realizado no processo de classificação



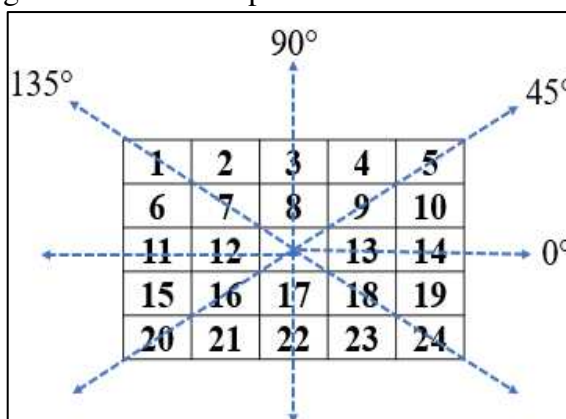
Fonte: dados de pesquisa (2019)

Para a análise da qualidade das segmentações foi realizada a partir de análise visual das imagens de referências com os segmentos correspondentes, assim como realizou-se a inspeção visual dos segmentos com imagens de melhor resolução espacial como as Sentinel 2, Cbers 2B, Cbers 4A e imagens do Google Earth pro, visando identificar possíveis inconsistências entre as feições identificadas e os dados de referência.

3.4.3 Extração de atributos

A segmentação de imagens possibilita que sejam calculadas e analisadas outras informações que vão além dos valores dos pixels e permite que sejam diferenciados os objetos que compõem a paisagem, principalmente em regiões caracterizadas pela elevada semelhança espectral, como é o caso do Cerrado, sendo utilizada uma abordagem estatística que considera os padrões de textura das imagens a partir da Matriz de Coocorrência de níveis de cinza-GLCM (figura 10).

Figura 10 – Análise por matriz de coocorrência



Fonte: adaptado de Brasil (2010)

A GLCM corresponde a uma tabulação de quantas combinações diferentes de valores dos pixels ocorrem em uma imagem segundo um conjunto de medidas quantitativas das intensidades de cinza dentro do segmento, extraídos conforme o padrão de vizinhança entre dois pixels por vez, um de referência e o outro vizinho, que possibilita caracterizar diferentes padrões dentro da imagem (Haralick; Shapiro, 1985; Zanotta, Ferreira e Zortea, 2019).

Desse modo, foram extraídos nove índices espectrais (quadro 5)³⁵ para cada um dos planos de informações (seis bandas multiespectrais e quatro índices de vegetação derivados), o que totalizou 90 (noventa) atributos.

Quadro 5 – Atributos extraídos a partir da matriz de coocorrência de nível de cinza

Parâmetro	Descrição	Equação	
A	Mede quão diferentes são os elementos GLCM. Valores mais altos significam regiões com alto contraste.	$\sum_{i=0}^{D-1} \sum_{j=0}^{D-1} p_{i,j} \vee i - j \vee$	≥ 0
B	Mede o distúrbio em uma imagem. Quando a imagem não é uniforme, muitos elementos GLCM de valores pequenos, resultando em grande entropia.	$-\sum_{i=1}^{D-1} \sum_{j=1}^{D-1} p_{ij} \log p_{ij}$	≥ 0
C	Retorna uma medida do contraste de intensidade entre um pixel e seu vizinho sudeste sobre o objeto. O contraste é 0 para um objeto constante. Também é conhecido como <i>Sum of Squares Variance</i>	$\sum_{i=0}^{D-1} \sum_{j=0}^{D-1} p_{i,j} \cdot i - j ^2$	≥ 0
D	Assume valores mais altos para diferenças menores do GLCM.	$\sum_{i=1}^{D-1} \sum_{j=1}^{D-1} \frac{p_{ij}}{1 +}$	≥ 0
E	Ele retorna a raiz quadrada do segundo momento angular, calculada pela soma dos elementos quadrados em GLCM. A energia é 1 para uma imagem constante.	$\sum_{i=1}^{D-1} \sum_{j=0}^{D-1} j = 0^{D-1} p_{i,j}^2$	-----
F	Retorna o valor médio de todos os N pixels dentro da região.	$\sum_{i=1}^N \frac{px_i}{N}$	≥ 0
G	Retorna o desvio padrão de todos os N pixels (μ é o valor médio).	$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (px_i - \mu)^2}$	≥ 0
H	Retorna a variação de todos os pixels (não fictícios) μ (o valor médio) dentro do objeto.	$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (px_i - \mu)^2}{N-1}$	
I	Calcula a mediada para todos os N pixel dentro do segmento.	$m = p \frac{(n+1)}{2} \infty$	

A-Dissimilaridade; B-Entropia; C-Contraste; D-Homogeneidade; E-Energia; F-Média; G-Desvio padrão; H-Variância; I-Mediana

Fonte: Adaptado de Körting *et al.* (2013)

³⁵ A etapa de extração de atributos foi realizada com o plugin Geodma (Korting *et al.*, 2013) implementado no sig TerraView® 5.3.3, cabe destacar que apesar de extraídos todos os índices, alguns foram suprimidos por

Após a etapa de extração, foi realizada a padronização atributos que caracteriza os segmentos em um intervalo de valores comuns com intuito de remover as diferenças de grandezas e, assim, evitar possível enviesamento dos dados no momento da classificação. Para tanto, elaborou-se um script em ambiente de programação Python 3.10, utilizando o algoritmo *StandardScaler*, do pacote *preprocessing* implementado na biblioteca Scikit-Learn, que realiza o processo de padronização segundo os valores de média e desvio padrão, conforme mostrado na equação 9.

$$V = \frac{x-m}{\sigma} \quad (\text{Equação 9})$$

Pontua-se que x representa o valor observado, m corresponde à média aritmética e σ à variância dos valores dos atributos testados. A padronização foi escolhida por manter as características originais dos dados, ou seja, apesar de ocorrer uma mudança nos valores, não ocorrem alterações significativas no padrão de distribuição dos dados.

3.4.3 Treinamento amostral

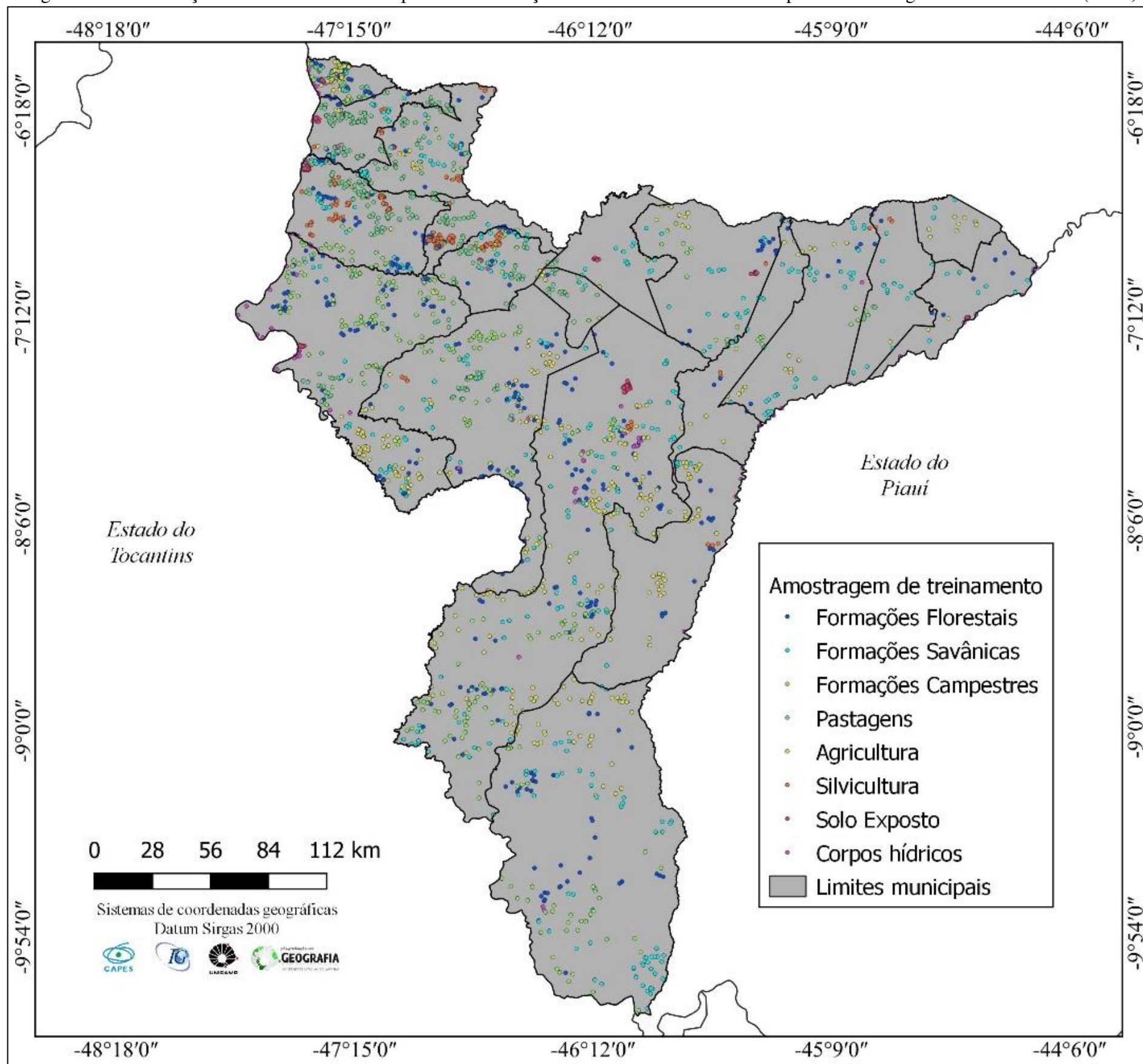
Para Rosa (2020) o maior desafio para a classificação de imagens de sensoriamento remoto e a definição de amostras, na qual deve focar em dois requisitos básicos: i) apresentar boa qualidade, ou seja, ter um elevado grau de pureza para a separação das classes; ii) ter uma boa distribuição espacial, devendo estar distribuída em toda a área.

Desse modo, o para o processo de treinamento, foi coletada uma série de pontos amostrais, utilizando como referência as imagens de alta resolução disponíveis na plataforma *GoogleEarth^{pro36}*, por verificação em campo combinado também com uma composição falsa cor no vermelho RGB-453 (infravermelho, infravermelho médio e vermelho) das imagens Landsat utilizadas (subsidiada por imagens Sentinel 2 e Cbers 2B e 4A). A escolha da composição está relacionada à alta reflectância da vegetação no comprimento de onda do infravermelho, realçando significativamente diferentes feições, garantindo uma melhor separabilidade visual entre as classes e possibilitando um maior nível de pureza entre as amostras selecionadas (figura 11 e figura 12).

apresentarem padrão nulo, o que pode ser associado a mudança no valor do pixel da imagem após a transformação em valores de reflectância de superfície.

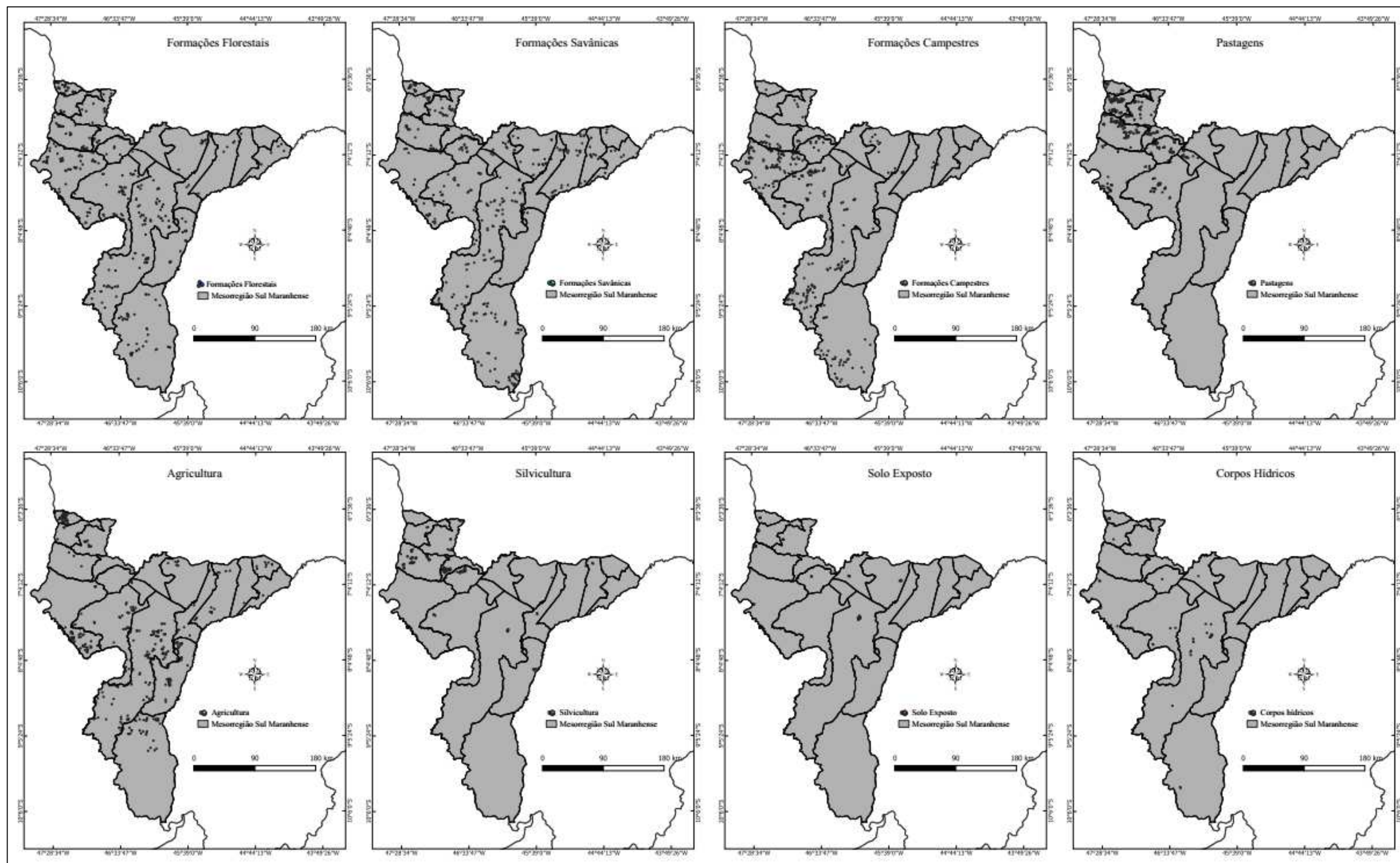
³⁶ Conforme relato realizado por Santos ([s.r]), o Google Earth utiliza um misto de operadoras de satélite e também faz uso de fotografias aéreas, com dois provedores principais que licenciam imagens para o Google Earth: a DigitalGlobe, empresa americana que licencia para o GE imagens de satélite Quickbird (60 cm), GeoEye-1 (50 cm), IKONOS (1m), WorldView-2 e 3 (50 cm), e a Airbus, empresa francesa (?) que fornece imagens de satélite SPOT-5 (10 m e 2,5 m), SPOT-6 (1,5m) e Pleiades (50 cm). A partir de 2021 passou a integrar em seu catálogo imagens do Landsat.

Figura 11 – distribuição dos Pontos amostrais para a classificação do uso e cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense (2020)



Fonte: dados de pesquisa, 2023

Figura 12 – Distribuição amostral por classe temática



Fonte: dados de pesquisa, 2023

Considerando que o padrão de cobertura por classe temática não é homogêneo, realizou-se um processo de balanceamento aleatório das amostras coletadas aplicando-se apenas 70% das amostras por classe, com intuito de não ocasionar distorções associadas ao padrão amostral e enviesar o classificador, e os 30% restantes foram usados para a eventual análise de acurácia do algoritmo. A tabela 2 apresenta o quantitativo amostral e a distribuição espacial por classe utilizados para a etapa de treinamento do classificador.

Tabela 2 - Amostragem de treinamento para treinamento do RF

	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	Total
1990	195	290	227	169	221	---	47	63	1.217
1995	413	532	325	328	351	---	73	87	2.109
2000	445	649	534	369	352	---	84	80	2.513
2005	421	571	496	374	347	---	87	88	2.533
2010	437	597	495	512	455	78	95	8	2.745
2015	380	407	332	394	458	172	94	73	2.310
2020	381	407	325	417	518	183	90	79	2.400

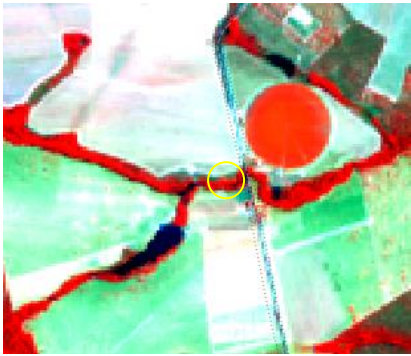
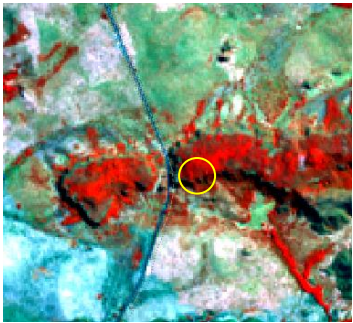
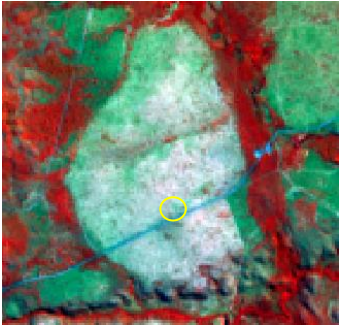
Fonte: dados de pesquisa (2021)

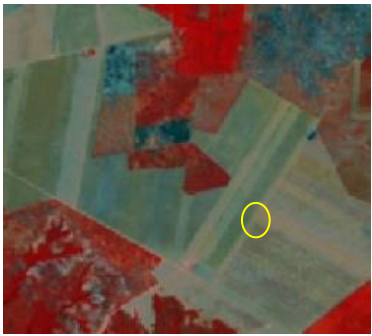
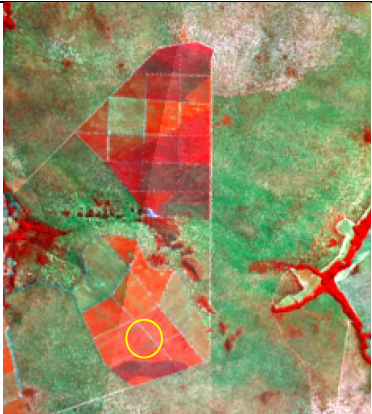
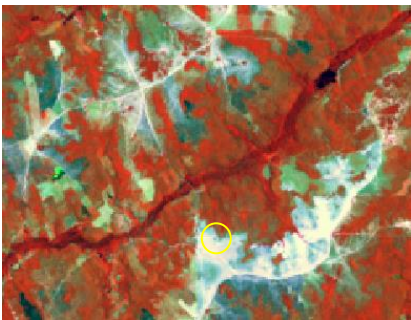
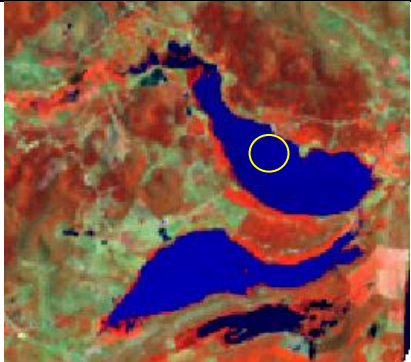
Para subsidiar a coleta de amostras de treinamento, foi elaborada uma chave de interpretação (quadro 6) com objetivo de distinguir visualmente nas imagens as tipologias de coberturas da terra e seus respectivos usos. Para tanto, considerou-se critérios de variabilidade espacial, fitofisionomia, tonalidade/cor, textura, forma e localização, sendo adaptadas do atlas de cobertura da terra do IBGE (2009), do TerraClass (2013).

Com base nas informações observadas na chave de interpretação e nas observações in loco, e adotando os critérios descritos em IBGE (2009) que define as formas de uso em até três níveis categóricos, foram identificadas nove classes temáticas³⁷: formações florestais, formações savânicas, formações campestres, pastagens, lavouras temporárias, silvicultura, corpos hídricos, solo exposto e áreas não identificadas (sombras e nuvens, ou cicatrizes de queimadas).

³⁷ Apesar de mostrar a classe área construída, é importante destacar que, por não apresentar áreas quantitativamente representativas para a região (menos de 1%) e por ter a resposta espectral semelhante à classe solo exposto e culturas temporárias (solo preparado), o que ocasionou intensa confusão no momento da classificação dos objetos, optou-se por vetorizar manualmente por interpretação visual, apesar disto, decidiu-se por caracterizar as áreas construídas na chave de interpretação, para melhor informar sobre as classes presentes e suas respectivas características.

Quadro 6 – Chave de interpretação para mapeamento de uso da terra da Mesorregião Sul Maranhense

Nível I – Cobertura naturais			
Classe	Imagem	Foto	Descrição
Formações Florestais			Cor vermelho, variando do vermelho escuro ao vermelho médio. Apresenta padrão heterogêneo de textura rugosa e sem forma definida. Representa áreas de vegetação de porte denso médio.
Formações Savânicas			Correspondem à vegetação de porte médio, com textura rugosa e padrão variando entre média/média-baixa, sem forma definida, cor variando do magenta ao verde azulado, com menor densidade de árvores e porte mais baixo.
Formações Campestres			Apresenta coloração variando do verde ao verde azulado e marrom, padrão heterogêneo com textura rugosa e sem forma definida, podendo ainda apresentar pigmentação pontual avermelhada, composta por gramíneas e arbustos de baixa densidade, mesclando vegetação de baixo porte.
Nível II – Coberturas antrópicas agrícolas			
Classe	Imagem	Foto	Descrição
Pastagens			Cor variando do magenta (solo preparado ou pastagem seca) ao verde claro (pastagens plantadas densa e verde) e ao cinza, textura variando entre lisa (pastagem plantada) à intermediária (ligeiramente rugosa, quando associada a pasto sujo), forma regular, geralmente associada a um tipo de espécie.

Áreas agrícolas			Padrões homogêneos, forma regular bem definida, textura lisa, próximo a áreas de servidões, coloração variando do azul ao marrom, podendo também ter tonalidades avermelhadas, dependendo do estágio vegetativo da cultura.
Silvicultura			Possui padrões homogêneos, forma regular bem definida, textura lisa, com coloração variando do vermelho ao marrom. Corresponde a áreas de reflorestamento (plantio ou formação de maciços) com eucalipto como fornecedora de matéria-prima para a indústria madeireira, de papel e celulose.
Nível III – Outras coberturas			
Classe	Imagem	Foto	Descrição
Solo exposto			Coloração variando de verde azulada ao branco, forma irregular e textura lisa, sendo encontrado em grande parte próximo às bordas dos tabuleiros ou áreas de agricultura mecanizada.
Corpos hídricos			Apresenta variação de cor entre o azul ao magenta, com textura lisa e ligeiramente rugosa, com padrão de forma regular (ordenada) e irregular (desordenada), acompanhando estradas, rodovias e ruas.

Fonte: Adaptado de Sano *et al.* 2010. (A) Solo com plantio de cana na safra 2021/22. (B) áreas de Pastagens.

3.4.4 Escolha do Classificador

Visando identificar qual tipo de algoritmo se ajusta ao mapeamento de uso e cobertura da área, foi realizada comparação entre diferentes algoritmos de classificação por aprendizado supervisionado, sendo eles: i) Random Forest – RF; ii) Suport Vector Machine – SVM; iii) Decision Tree – DT; iv) K-Nearest Neighbors – KNN; v) Artificial Neural Networks – ANN³⁸. Optou-se por testar tais algoritmos por já apresentarem uso consolidado no processo de classificação de imagens de satélites, como presente em Lu e Weng (2007), Srivastava *et al.* (2011), Grinand *et al.*, 2013; Noi e Kappas (2018), Maxwell, Warner e Fang (2018), Pereira *et al.* (2020), Parreiras *et al.* (2022a); Parreira (2022b).

As medidas de exatidões das classificações foram obtidas conforme a avaliação visual e por medidas de acurácia F1 Score, condicionante Kappa, exatidão global e erros de omissão e comissão, utilizando-se 3.937 pontos amostrais, dos quais 2.351 foram usados para o treinamento do classificador e 1.586 para o teste de acurácia da classificação, tendo como base a imagem Landsat 8 datada do ano de 2020.

Para evitar o enviesamento do algoritmo, foi realizado um balanceamento amostral, sendo utilizado um total de 70% das amostras de treinamento por classe, e os ajustes dos classificadores testados foram realizados conforme o manual de usuário do scikit-learn e Tensor Flow, bibliotecas presentes no Python.

Para avaliar se existem diferenças estatísticas entre as classificações resultantes, foi utilizado o teste Z (equação 10) (Congalton; Green, 1991) que avalia o nível de significância estatística entre os resultados dos diferentes conjuntos de dados analisados. O cálculo da σ^2 (equação 11) utiliza as equações como descrita em Amaral *et al.* (2009).

$$Z = \frac{K_2 - K_1}{\sqrt{\sigma_{K_2}^2 + \sigma_{K_1}^2}} \quad \text{Equação 10}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2-\theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4-4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad \text{Equação 11}$$

Onde: K_1 é valor do kappa da classificação 1 e K_2 corresponde ao valor do índice kappa 2; é a variância do índice kappa referente às classificações 1 e 2. Se $Z \geq Z_{\alpha/2}$ a classificação é significantemente melhor que uma distribuição aleatória; $\alpha/2$ é o

³⁸ Os parâmetros de ajustes dos algoritmos testados foram: Random Forest, 500 árvores aleatórias e um número mínimo 10 atributos; KNN com 9 vizinhos, para o algoritmo DT utilizou o total de atributos para a geração das árvores de decisão, com padrão para o SVM utilizou-se um modelo multiclasse não linear conforme descrito no manual do usuário do scikit-learn.

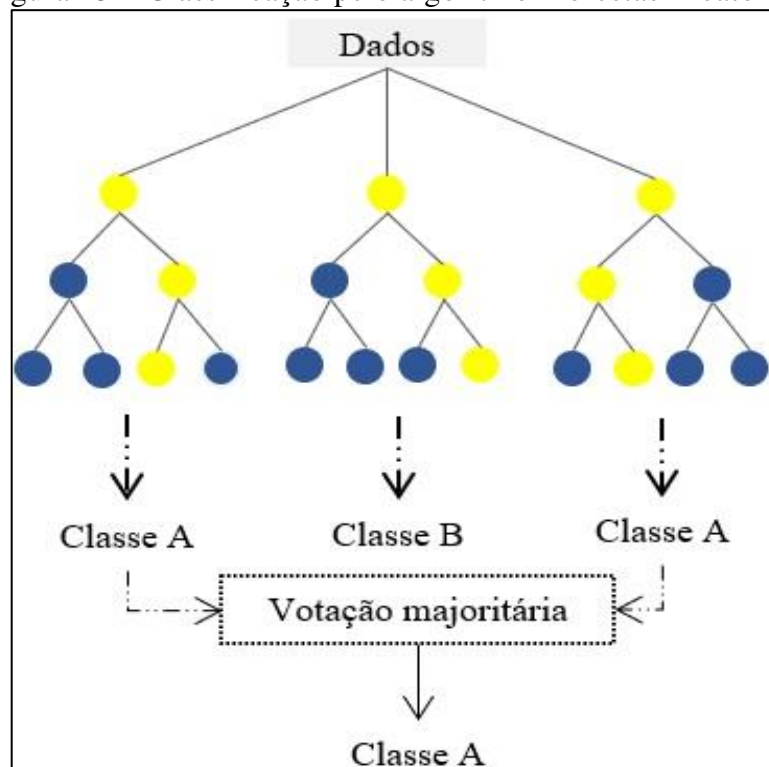
nível de confiança nos dois lados da curva no teste Z e o número de graus de liberdade é assumido ser infinito (Figueredo; Vieira, 2007).

Com a análise dos resultados optou-se pelo uso do algoritmo RF que produziu uma classificação com melhor precisão em comparação com outros métodos comumente usados (McInerney; Nieuwenhuis, 2011; Li *et al.*, 2014; Belgiu; Dragut, 2016; Santos *et al.*, 2017; Parreiras, *et al.*, 2022a; Pereira *et al.*, 2022b).

3.4.5 Classificação Digital de Imagem

O processo de classificação de imagens foi realizado com o uso do algoritmo de classificação Random Forest-RF. Proposto por Breiman (2001) o RF é um algoritmo de regressão e classificação não paramétrico e supervisionado que cria e ajusta vários classificadores do tipo de árvores de decisão (figura 13) que quando combinadas fornece elevada precisão, sendo amplamente aplicado para a classificação do uso e cobertura da terra a partir de dados de Sensoriamento Remoto, com dados multiespectrais ou hiperespectrais (Belgiu e Drăgu, 2016; Melville *et al.*, 2004; Zanotta *et al.*, 2019; Masris Sicre *et al.*, 2020).

Figura 13 – Classificação pelo algoritmo Florestas Aleatórias



Fonte: adaptado de Zhang *et al.* 2020)

De acordo com Zhang e Yang (2020), cada árvore contribui com um único voto, e a classificação final é determinada por método de votação majoritária (*majority voting*) ou pela previsão média de todas as árvores criadas na floresta. O algoritmo de Random Forest realiza o processo de construção das múltiplas árvores de decisão, utilizando uma técnica inicial denominada de *bagging*³⁹, e nesse processo o conjunto de dados originais é separado em vários subconjuntos que são usados para a criação das árvores.

O processo de escolha das features que compõem cada subconjunto é feito aleatoriamente e com reposição, ou seja, todas as amostras utilizadas para compor um subconjunto são novamente recolocadas no dado e podem ser selecionadas outras vez para a composição de um novo subconjunto. Outra importante característica é que nem todas as amostras são selecionadas no processo, de modo que as variáveis que não entram no sorteio inicial são chamadas de *out-of-bag* – OOB, e podem ser utilizadas para estimar erros de classificação e obter a importância das variáveis na composição de cada árvore aleatória criada, o que garante maior confiabilidade no resultado (Adam *et al.*, 2014).

Ao usar o algoritmo RF, tem-se a necessidade de determinar dois parâmetros: o número de variáveis por folha (*mtry*) e o número máximo de árvores que será formado em toda a análise (*ntree*). O *mtry* corresponde ao número máximo de atributos que formarão cada análise, sendo determinado a partir da raiz quadrada do valor total de variáveis usadas no estudo.

Já para o *ntree*, Braima (2001) destaca que o número de árvores padrão a ser formado é 500, porém, para se identificar os melhores padrões de ajustes e melhorar a performance do classificador RF, foram testados os valores de exatidão para diferentes números de árvores de decisão, sendo testados entre 100 e 1000 árvores.

Por ser um algoritmo que preza pela aleatoriedade, OOB é muito utilizado para estimar erros de classificação, portanto, o RF coleta dois terços (2/3) de treinamento com substituição, enquanto os demais são dados OOB e tais amostras são atribuídas a árvores que ainda não foram utilizadas, considerando que a diferença é usada entre a classe esperada e a real, igualmente avaliando a exatidão da classificação (Prasad, Iverson e Liaw, 2006).

Desse modo, para o processo de classificação das imagens Landsat, foi construída uma série de rotinas em ambiente de programação Python, a partir do uso da biblioteca de aprendizado de máquina *Scikit-Learn* na qual encontra-se implementado

³⁹ Bagging corresponde a uma técnica de separação de um conjunto de dados originais em vários subconjuntos, os quais são utilizados para reduzir a variância ao treinar um modelo em conjuntos de dados ruidosos, criando vários modelos para que cada um compense os erros dos outros.

um conjunto de algoritmos para classificação e regressão, incluindo o *RandoForestClassifier* que possui todos os parâmetros para a aplicação do RF.

Essa biblioteca necessita da implementação e dos ajustes dos hiperparâmetros para treinamento, validação e posterior classificação que são fundamentais para utilizar o algoritmo RF, sendo preciso apenas indicar o número de árvores de decisões a partir do parâmetro `n_estimators`. Os outros parâmetros⁴⁰ foram conforme descritos no manual de usuário⁴¹ do Sciki-learn, tendo em vista que o objetivo era analisar os níveis de acurácia para os dados de acordo com a mudança dos parâmetros `mtree` e `ntree`.

3.4.6 Exatidão das classificações

A avaliação da acurácia das classificações foi realizada com base em métricas quantitativas derivadas da matriz de confusão ou matriz de contingência, sendo extraídos: i) Exatidão Global, ii) Índice Kappa e o iii) F1 Score. A matriz de confusão corresponde a uma representação matricial quadrada de ordem $m \times m$, na qual são avaliados os níveis de similaridade entre dados de referência, geralmente dispostos em colunas e dados de classificação inseridos em linhas, conforme presente na figura 14 (Congalton; Green, 2006).

Figura 14 – Representação gráfica da matriz de erros em classificação

	A	B	C	D	Σ das linhas
A	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{1k}	n_{1+}
B	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{2k}	n_{2+}
C	n_{31}	n_{32}	n_{33}	n_{3k}	n_{3+}
D	n_{41}	n_{42}	n_{43}	n_{4k}	n_{4+}
Σ das colunas	n_{+1}	n_{+2}	n_{+3}	n_{+k}	n

Onde: A, B, C e D correspondem às classes identificadas

Fonte: adaptado de Landis e Koch (1977)

Na matriz de confusão se assume um número N de amostras dispostas entre células, em que cada amostra é atribuída a uma das k classes no mapa, distribuídas de maneira independente a uma das mesmas k classes no conjunto de dados de referência, e que possibilita o cálculo de índices de

⁴⁰ Os demais parâmetros foram deixados em default, conforme descritos no manual de usuário do SciKit-Learn, sendo esse “`max_depth=None`”, “`min_samples_leaf=1`”, “`min_weight_fraction_leaf=0.0`”, “`max_features='auto'`”, “`max_leaf_nodes=None`”, “`bootstrap=True`”, “`min_impurity_split=0.0`”, “`random_state=None`”, “`verbose=0`”, e “`warm_start=False`” (Manual de Usuário, [s.d]).

⁴¹ <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html>

avaliação de classificação como acurácia global, índice de desempenho Kappa, além dos erros de comissão e exatidão do produtor e do usuário (Landis; Koch, 1977)

Para a composição da matriz de confusão e posterior validação das classificações, foi realizada uma seleção semiestruturada de pontos, que variaram conforme o ano base da imagem, sendo utilizada uma série de imagens do programa Sentinel 2 e Cbers 4A, além de um conjunto de 453 pontos coletados durante atividades *in loco* realizadas durante os meses de fevereiro de 2020, junho de 2021 e fevereiro de 2023 (tabela 3).

Tabela 3 – Amostragem classificatória dos dados de validação

--	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
FF	70	225	297	278	187	231	301
FS	68	358	433	390	256	258	327
FC	58	277	356	341	212	257	274
PAS	53	188	246	332	219	281	325
AGR	82	151	235	281	195	328	350
SIL	0	0	0	0	33	154	132
SE	0	44	58	57	40	52	52
CH	45	44	58	56	32	44	58
Total	376	1287	1683	1735	1174	1605	1819

Fonte: dados de pesquisa (2021)

A exatidão global (equação 12) indica a porcentagem de acertos identificados em uma classificação a partir do número total de amostras classificadas corretamente e sua relação com o número total de amostras utilizadas (Congalton; Green, 1991).

$$Eg = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{n} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que Eg representa a exatidão global da classificação; $\sum_{i=1}^r x_{ii}$ corresponde à soma total de amostras classificadas corretamente; n o número total de amostras utilizadas na análise. Como representa o nível de precisão geral da classificação, a exatidão global é diretamente interpretável, uma vez que corresponde às probabilidades gerais de uma região escolhida aleatoriamente ser corretamente classificada, além de possibilitar a análise dos erros de comissão (produtor) e omissão (usuário) referentes às diferentes classes encontradas em um determinado mapa temático.

Já o índice Kappa (equação 13) possibilita avaliar a diferença estatística das classificações. De acordo com Silva Junior *et al.* (2014), esse índice apresenta vantagens

sobre a exatidão global, visto que incorpora todos os elementos da matriz de erro, os objetos classificados corretamente ou não; além disto, avalia a exatidão temática porque é mais sensível às variações dos erros de comissão e omissão. O índice *Kappa* varia de -1 a 1, e quanto mais próximo de 1 maior a precisão da classificação, sendo calculada a partir do produto da acurácia global pelos erros de comissão.

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^m n_{ij} - \sum_{i=1}^m (n_i n_j)}{n^2 - \sum_{i=1}^m n_i n_j} \quad (\text{Equação 13})$$

Os resultados foram comparados aos valores de desempenho estabelecidos por Landis e Koch (1997), nos quais atribuem características qualitativas aos níveis de desempenho de classificação, indicando assim a qualidade do mapa temático, sendo esse: i) péssimo (*Kappa* < 0,0); ii) ruim (*Kappa* entre 0,0 e 0,2); regular (*Kappa* entre 0,2 e 0,4); iii) bom (*Kappa* entre 0,4 e 0,6); iv) muito bom (*Kappa* entre 0,6 e 0,8); v) excelente (*Kappa* > 0,8).

Outros importantes índices derivados da matriz são a acurácia de produtor (equação 14), que são os segmentos corretamente atribuídos à sua classe pelo classificador; e a acurácia de usuário (equação 15), correspondente a amostras de referência classificadas erroneamente como pertencentes a outras classes quando comparados ao mapa.

$$Produtor = \left(\frac{VP}{VP+FP} \right) \quad (\text{Equação 14})$$

$$Usuário = \left(\frac{VP}{VP+FN} \right) \quad (\text{Equação 15})$$

Frisa-se que AP e AU são, respectivamente, as acurácias de produtor e acurácias de usuários resultantes da matriz de confusão. VP corresponde a todos os pixels classificados corretamente na análise. FP representa os erros de omissão e corresponde a amostras que não foram classificadas de acordo com as classes de referência, ou seja, é o erro cometido ao se atribuir a um pixel ou segmento uma classe, quando esse pertence a outra classe. Já FN é o erro de inclusão e indica a quantidade de registros que foram classificados de maneira incorreta, isto é, o classificador indicou uma classe enquanto a verdade terrestre era outra.

A partir dos valores de produtor e acurácia, calculou-se o F1 Score (equação 16), uma métrica que analisa a taxa de precisão por classe, ou seja, avalia a taxa de acerto exclusivamente

para a classe. O processo de análise a partir do F1 score corresponde à média harmônica entre as taxas de precisão classificadas corretamente em relação ao total de dados utilizados.

$$f1\ Scores = \left(\frac{2*AP*AC}{AP+AU} \right) \quad (\text{Equação 16})$$

Para grande parte dos problemas, o F1 Score é uma métrica melhor que a exatidão global e por índice Kappa, principalmente em casos em que os falsos positivos e falsos negativos possuem impactos diferentes para seu modelo. Afinal, o F1 Score cria um resultado a partir dessas divergências.

3.4.7 Detecção de mudanças

Após processo de classificação, realizou-se a etapa de detecção de mudanças e utilizou-se parâmetros descritos em Pontius *et al.* (2004) e Rodrigues (2018), fazendo uso de um modelo baseado em pós-classificação. No modelo de pós-classificação tem-se a necessidade de dois arquivos classificados de diferentes datas com critérios espaciais idênticos (mesmo tamanho de pixel e limites de área), e, a partir de tabulação cruzada (figura 15) é identificada a quantidade de pixels que sofreu mudança entre uma data inicial e uma data final, conforme a matriz geográfica de Barry.

Figura 15 – Matriz de tabulação cruzada

Classe no momento 1	Classe no momento 2				Total no momento 1	Perda
	Classe 1 (j)	Classe 2 (j+1)	Classe 3 (j+2)	Classe 4 (j+3)		
Classe 1 (i)	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	$\sum_{j=1}^n C_{1+}$	$\sum_{j=1}^n C_{1+} - C_{11}$
Classe 2 (i+1)	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	$\sum_{j=1}^n C_{2+}$	$\sum_{j=1}^n C_{2+} - C_{22}$
Classe 3 (i+2)	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	$\sum_{j=1}^n C_{3+}$	$\sum_{j=1}^n C_{3+} - C_{33}$
Classe 4 (i+3)	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	$\sum_{j=1}^n C_{4+}$	$\sum_{j=1}^n C_{4+} - C_{44}$
Total no momento 2	$\sum_{i=1}^n C_{+1}$	$\sum_{i=1}^n C_{+2}$	$\sum_{i=1}^n C_{+3}$	$\sum_{i=1}^n C_{+4}$	$\sum_{i=1}^n C_{ij} = At$	
Ganho	$\sum_{i=1}^n C_{+1} - C_{11}$	$\sum_{i=1}^n C_{+2} - C_{22}$	$\sum_{i=1}^n C_{+3} - C_{33}$	$\sum_{i=1}^n C_{+4} - C_{44}$		

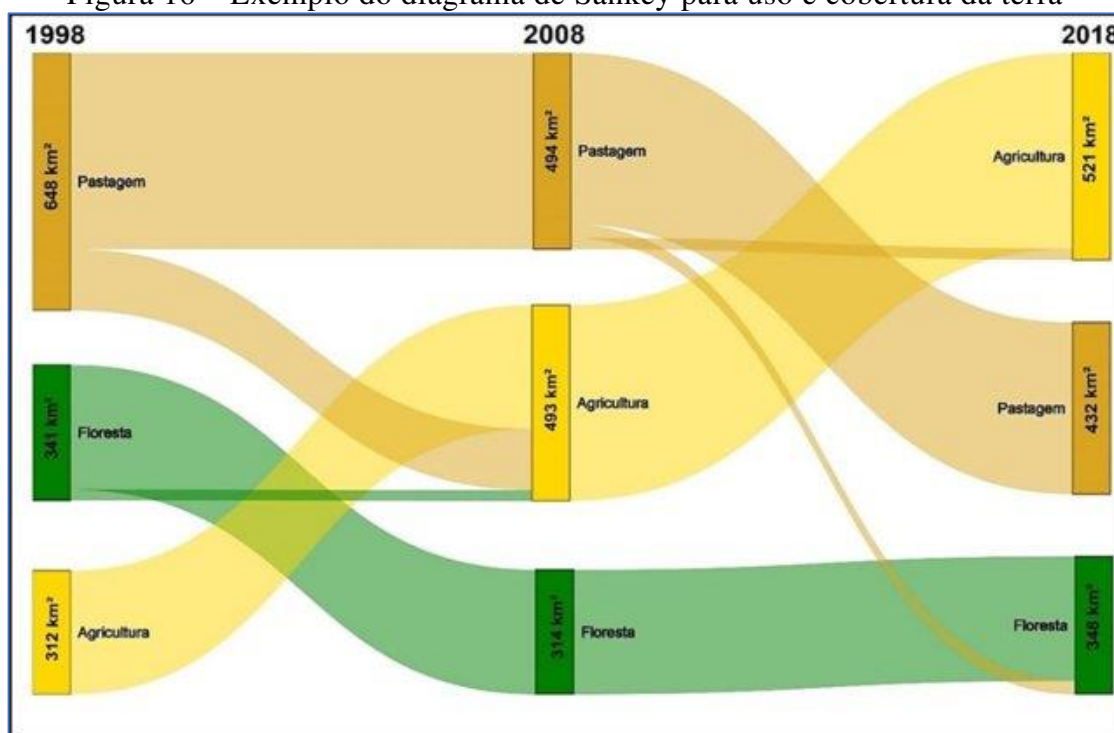
Fonte: adaptado de Pontius *et al.* (2004)

A análise por tabulação cruzada possibilita a identificação de perdas, ganhos e persistências entre as classes fazendo uso de funções zonais locais (Pontius Junior; Shusas; Mceachern, 2004). No intuito de melhor entender as mudanças no uso e cobertura da terra, a

partir da Matriz de Tabulação Cruzada, foram calculadas a percentagem de classe, as taxas de perda e de ganho e de pertinência para cada classe⁴².

Os dados resultantes da tabulação cruzada foram utilizados para a criação dos diagramas de Sankey (figura 16), um modelo de representação que mostra em termos de área o padrão de conversão entre as classes de uso e cobertura da terra. Conforme Demarchi (2020), os diagramas de Sankey enfatizam a direção e o fluxo de mudanças e pertinências entre diferentes classes, identificando o dinamismo em termos de área.

Figura 16 – Exemplo do diagrama de Sankey para uso e cobertura da terra



Fonte: Vieira, Ramos e Tieppo, 2021

Para a criação do diagrama de Sankey, foi elaborada uma série de rotinas em python, a partir da biblioteca de criação de gráficos *plotly*, utilizando a ferramenta *graph_objects*. E, para a implementação do gráfico de Sankey a partir do plotly é necessária a parametrização de alguns dados: i) o quantitativo de área convertida entre classes, usado aqui em hectares; ii) os fluxos direcionais de mudanças (ex. de formações florestais para pastagens); iii) a paleta de cores que corresponderá a cada classe (default=green). Como saída

⁴² Para o processo de tabulação cruzada é necessária a conversão das classificações para formato raster (geotiff), considerando que o relatório apresenta o total de pixel que passou de um estágio para outro, não sendo possível com dados em formato vetorial, desse modo, as imagens foram convertidas com um padrão espacial de 30m (resolução espacial de 30 m x 30 m).

é gerado um gráfico direcional de fluxo, onde as taxas de mudanças são representadas sobre linhas, e a direção indica uma classe de saída e uma classe ou mais classes de entrada.

3.5 Atividade de campo

Durante os dias 15 a 22 de fevereiro de 2020, 22 a 28 de junho de 2022 e 22 a 28 de fevereiro de 2023, foram realizadas atividades de campo focadas na validação de dados de uso e cobertura da terra, bem como no levantamento fotográfico da área de estudo.

Em cada uma dessas datas, foram coletadas informações precisas e atualizadas. Utilizando dispositivos GPS Garmin Etrex, além de informações com o aplicativo de levantamento de dados Agrotag elaborado pelos pesquisadores da Embrapa (2013), sendo marcados pontos de referência que serviram como base para a comparação com dados de sensoriamento remoto.

Além disso, foram capturadas fotografias aéreas e terrestres, proporcionando uma visão detalhada das condições locais. Essas imagens foram posteriormente analisadas para identificar variações sazonais e mudanças no uso da terra. Durante as expedições de fevereiro de 2020 e 2023, a equipe enfrentou desafios climáticos que testaram sua resiliência, principalmente com questões de acesso, visando que muitas das estradas encontravam-se com acesso limitado ao veículo utilizado.

Já em junho de 2022, as condições climáticas favoráveis permitiram um levantamento mais abrangente, ampliando a base de dados existente. As informações coletadas foram cruciais para validar modelos de classificação de uso da terra e para aprimorar a precisão dos mapas temáticos, contribuindo significativamente para o planejamento ambiental e a gestão sustentável dos recursos naturais da região.

3.6 Modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra

Após a etapa de classificação e validação dos mapas de uso e cobertura da terra, foram realizadas rotinas de simulação para a construção de cenários de tendência de mudança para a mesorregião Sul Maranhense até o ano de 2030. Para tanto, utilizou-se um modelo baseado em autômatos celulares em associação com o método de pesos e evidências integrados na plataforma de modelagem ambiental Dinâmica Ego (*Environment for Geoprocessing Objects*), uma plataforma gratuita e não comercial de código aberto desenhada em linguagem C++ e interface gráfica em Java⁴³, patentado e mantido pelo

⁴³ Conforme Machado (2022), os modelos implementados no Dinâmica Ego rodam em uma máquina virtual, a DinamicaVM, que fornece aos usuários uma arquitetura de conjunto de instruções de alto nível. Para que a

Centro de Sensoriamento Remoto-CSR do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, que possui, implementada em sua interface, uma série de algoritmos de manipulação e simulação de dados ambientais (Soares Filho; Cerqueira; Pennachin, 2002; Soares Filho *et al*, 2007).

O Dinâmica Ego é uma plataforma de modelagem de dados ambientais com interface gráfica baseada no paradigma do fluxo de dados, que oferece excelentes possibilidades de modelagem de dados espaciais, integrando em sua base desde modelos espaciais estáticos simples até dinâmicos, com elevado grau de complexidade, a exemplo dos modelos espacialmente explícitos, conhecidos como modelos de paisagem, modelos espaciais, ou modelos distribuídos, (Oliveira, 2014; Nogueira, 2022).

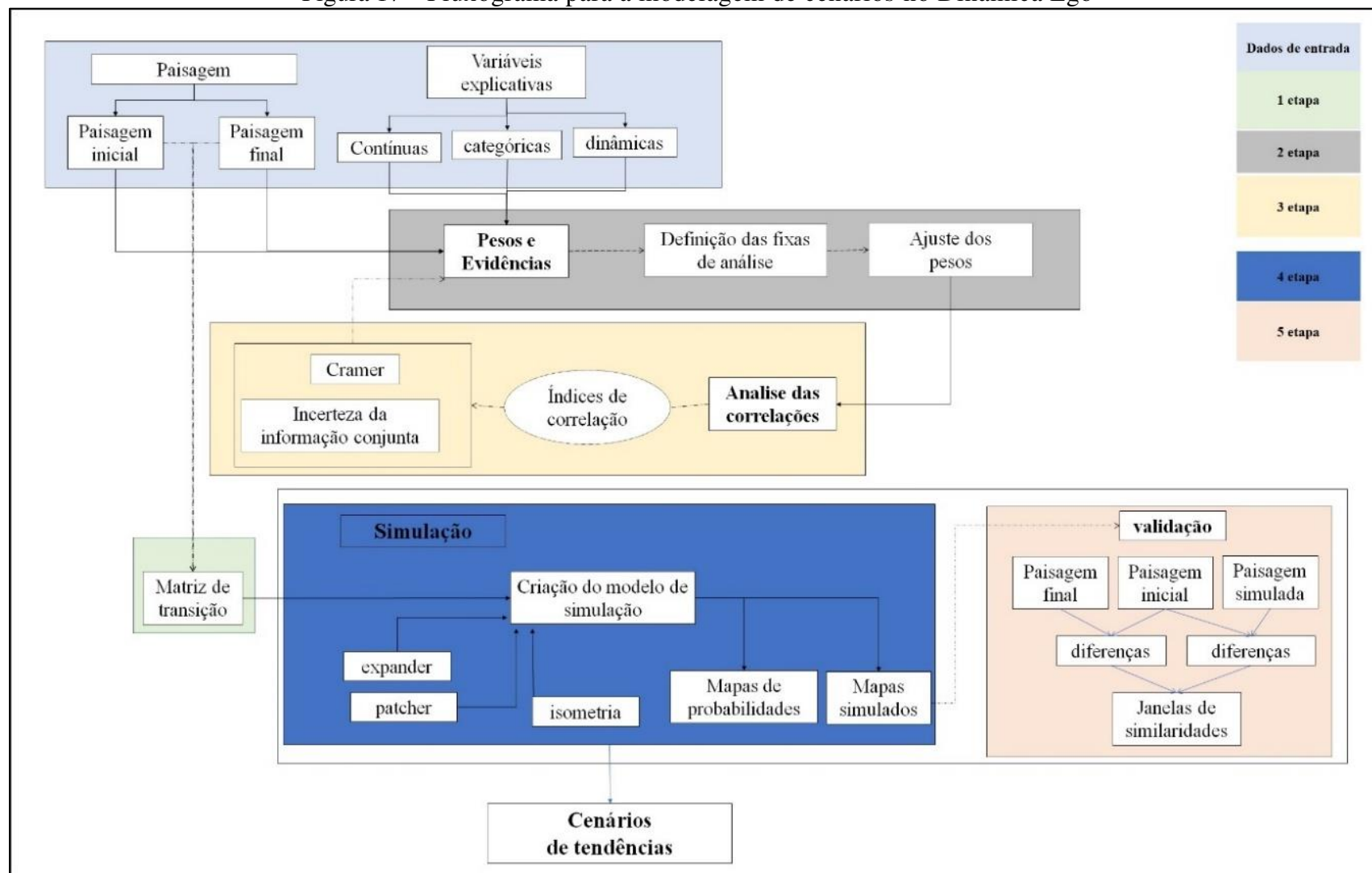
Oliveira (2014) destaca que o processo de modelagem dentro do Dinâmica Ego é realizado por meio da linguagem de programação EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) e utiliza como entrada dados temáticos discretos e contínuos, em formato matricial regular com células de mesma dimensão (resolução espacial iguais) e mesma dimensão espacial (linhas e colunas com mesmas dimensões).

Nesta pesquisa utilizou-se como entradas os mapas de 2015 (ano inicial) e 2020 (ano final), além de uma série de variáveis explicativas (dinâmicas e estáticas) que atuam como fatores externos às mudanças espaciais, influenciando na probabilidade ou não da ocorrência de uma transição.

No Dinâmica Ego o processo de modelagem dinâmica ocorre mediante cinco etapas e o resultado são mapas probabilísticos de mudanças de uso da terra, segundo um padrão de alocação de pixels, conforme ilustrado na figura 17.

plataforma seja mais flexível, é utilizado um conjunto de complementos chamados de “*functores*”, que compreendem as entradas, os procedimentos e as saídas, sendo ligados por linhas que indicam como os dados fluem dentro do modelo.

Figura 17 – Fluxograma para a modelagem de cenários no Dinâmica Ego



Fonte: adaptado de Soares Filho (1998)

A primeira etapa é definir as mudanças espaciais conhecidas entre dois períodos predefinidos – um inicial e um período final, essa etapa é realizada a partir da tabulação cruzada dos dados, que informa o percentual de mudança ocorrida no período de análise.

Após a definição das taxas de alocação mudança, é realizada a etapa de calibração do modelo, que corresponde a segunda etapa da análise, nessa fase são definidos os vetores externos que influenciam os processos de mudança espacial. No Dinâmica Ego utiliza-se o método de pesos e evidências, que associa uma série de variáveis espaciais independentes (estáticas e dinâmicas)⁴⁴ e que influenciam no processo de mudanças a partir de faixas preestabelecida.

Macedo, Almeida e Santos (2018) consideram essa etapa de significativa relevância, pois a seleção criteriosa das variáveis independentes é fundamental para o êxito na aplicação dos modelos, pois as interações com a variável dependente determinam-se as áreas com maior ou menor probabilidade de mudança.

A terceira etapa é a análise da correlação par a par entre as variáveis externas, mediante o tipo de transição espacial analisada, excluindo-se da análise uma das variáveis que apresentarem elevada correlação. Já a quarta etapa são definidos os critérios de expansão e fragmentação (*patcher e expander*) e os percentuais de alocação de pixels, resultando em taxas de probabilidades de transição para cada classe analisada.

O último passo é a validação dos dados, na qual se realiza a comparação entre os mapas simulados e reais, identificando o grau de acerto do modelo. Após essa etapa é realizada a simulação para a criação de cenários de expansão da agropecuária sobre a vegetação natural de Cerrado na mesorregião Sul Maranhense (Soares-Filho, 1998a; Ximenes *et al*, 2008).

As variáveis dinâmicas correspondem às distâncias para as áreas classificadas como pastagens, agricultura e silvicultura, e são criadas diretamente no Dinâmica Ego no momento de parametrização do modelo, que considera apenas o período inicial da análise (no caso aqui a classificação de 2015).

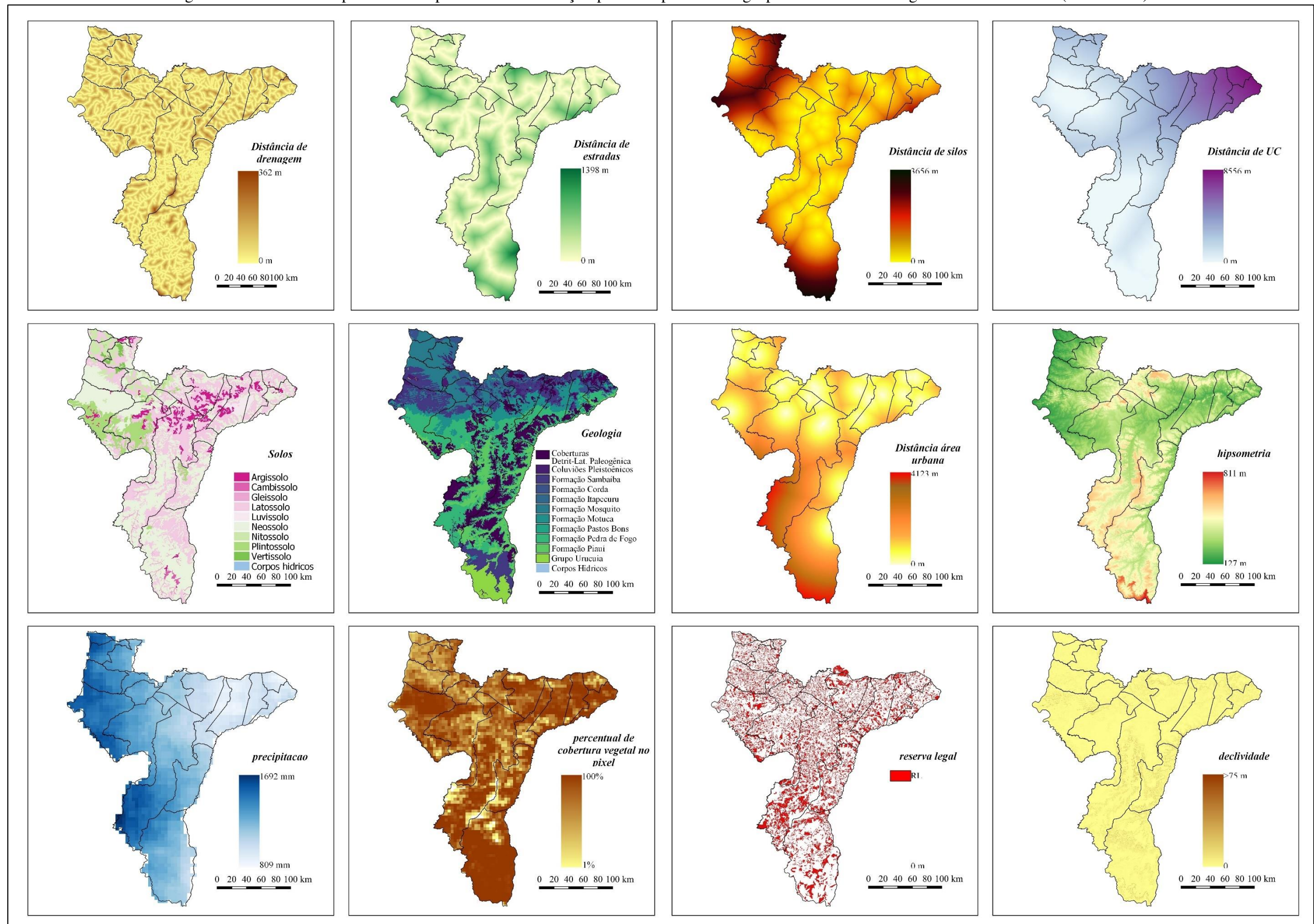
As variáveis estáticas foram organizadas em categóricas e contínuas. As variáveis categóricas corresponderam a informações caracterizadas em classes discretas, a saber, os tipos de solos, reserva legal, geologia e áreas prioritárias à conservação. O grupo das variáveis contínuas correspondem às variáveis mensuráveis em uma escala contínua, utilizando-se: a distância das rodovias principais e secundárias, distância dos rios, distâncias de cidades,

⁴⁴ Conforme Ferrari (2008), as variáveis estáticas correspondem a mapas de informações referentes às condições físicas da paisagem (declividade, hipsometria, solos), como também a mapas de processos antrópicos (localização de centros urbanos, distância de rodovias, distâncias de rios), já os mapas dinâmicos são gerados automaticamente no Dinâmica Ego, e correspondem, em geral, a mapas de distâncias a certos tipos de classes (distância de desmatamento), que apresentam significativo processo de dinamismo.

distâncias de silos e armazéns, percentual de cobertura vegetal no pixel, índice de precipitação, hipsometria, a declividade, a distância de unidades de conservação.

As variáveis que envolveram as distâncias dos objetos de análise foram elaboradas a partir de estimativas das distâncias euclidianas entre os objetos de referência (rios, estradas, uc, etc). Não foram definidas distâncias para as os dados de hipsometria e declividade, pois os dados foram derivados de imagens SRTM que constituem variáveis contínuas de terreno. A figura 18 ilustra a distribuição espacial das características de algumas variáveis estáticas usadas durante o processo de modelagem.

Figura 18 – Variáveis explicativas no processo de simulação para a expansão da agropecuária na Mesorregião Sul Maranhense (2015-2020)



Fonte: dados de pesquisa (2021)

No processo de cenarização, algumas regras foram preestabelecidas com objetivo de controlar o processo de alocação de pixels. A primeira é que o modelo não analisa processos de regeneração, considerando apenas as transições entre as classes natural (FF, FS, FC) para as classes antrópico agrícolas (PAS, AGR, SIL), pois a intenção é analisar áreas com potencial processo de conversão da vegetação florestal de Cerrado para a agropecuária, não adotando o processo inverso de transição.

A segunda é que se excluiu do modelo as transições para agricultura em áreas com declividade superior a 8%, pois essas áreas não apresentam boa aptidão para a mecanização. A terceira é que não ocorra transição natural para antrópico em áreas de APP de curso d'água (30 m de distância dos rios e a 50 m das áreas de nascentes) identificada na região.

A seguir serão descritas todas as rotinas de processamento para a simulação de criação dos cenários de tendência de expansão da agropecuária sobre a vegetação nativa de cerrado para a mesorregião Sul Maranhense.

3.6.1 Matriz de Transição

O primeiro passo para o processo de modelagem espacial no Dinâmica Ego é a definição das taxas de transições que ocorrem entre as classes. Nessa etapa é definida a quantidade de pixels que determinada classe passa para outra classe em um determinado período (Soares-Filho, 2007; Andrade *et al.*, 2016; Silva; Bacani, 2018).

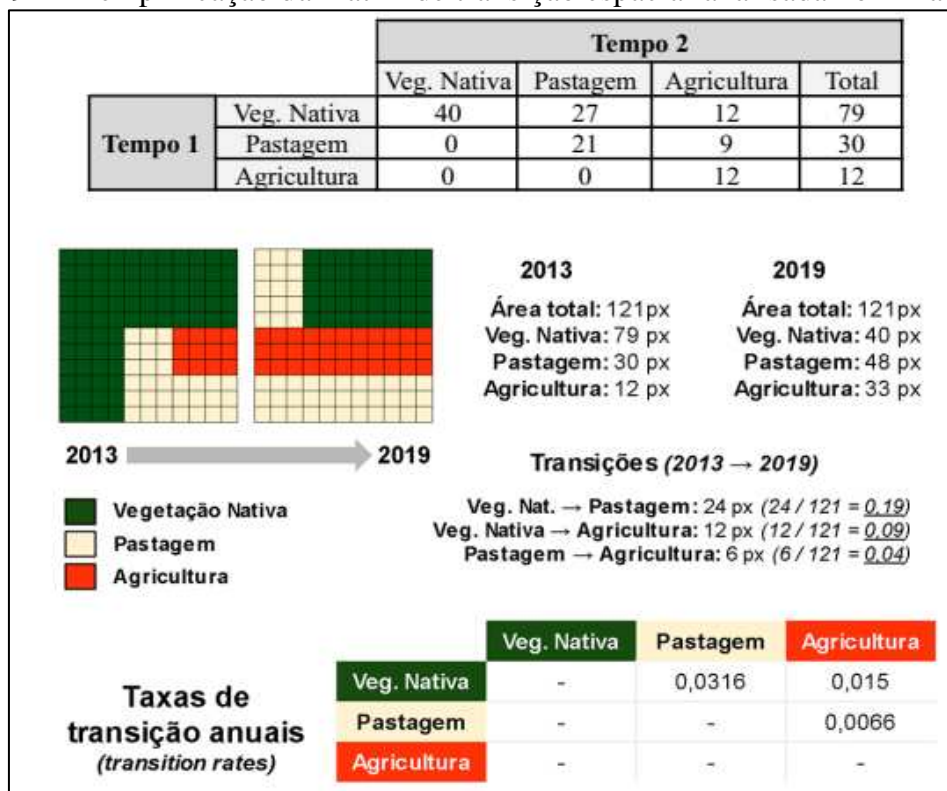
No Dinâmica Ego esse processo é realizado por meio da criação da matriz ergódica, que permite identificar o percentual de mudanças entre as classes, a partir matrizes globais de transição, sendo elaboradas as matrizes bidimensionais (simples) e dessas discretizadas em matrizes anuais (*multiple step*), conforme a equação 17 (Andrade *et al.*, 2016).

$$P_t^1 = HV_t^1 H^{-1} \quad (\text{Equação 17})$$

P é a matriz anual, H e V são seus autovetores e autovalores e t corresponde ao período de tempo analisado (Soares-Filho, 2002). No Dinâmica Ego a matriz de transição representa a probabilidade ou não de ocorrência de uma célula mudar seu estado inicial considerando transições já observadas, a partir da comparação direta entre dois mapas (um de estado inicial e um de estado final), onde são calculadas as taxas de mudanças de pixels (exemplo: quantidade de pixels de floresta em 2015 que se converteu em agricultura em 2020) em relação à quantidade total de pixels

da classe no tempo inicial (quantidade de pixels de floresta em 2015) e, posteriormente, são calculadas as probabilidades de um pixel mudar ou não seu estado (figura 19).

Figura 19 – Exemplificação da matriz de transição espacial analisada no Dinâmica Ego



Fonte: Nogueira (2022)

Os cálculos das taxas de transições foram analisados para as nove transições identificadas na área (tabela 4), e representam o percentual de pixels que apresentaram transição entre as classes tanto para a análise bianual quanto para o período probabilístico.

Tabela 4 – Percentual de transição entre as classes naturais e antrópicas (%)

2015→2020	Global	Probabilística
FF→PAS	3,81	0,67
FF→AGR	0,99	0,17
FF→SIL	0,07	0,01
FS→PAS	4,27	0,91
FS→AGR	4,21	0,90
FS→SIL	0,20	0,04
FC→PAS	5,83	1,19
FC→AGR	2,13	0,43
FC→SIL	0,10	0,02

Fonte: Dados de pesquisa (2023)

3.6.2 Pesos e evidências

Após o cálculo das transições entre as classes, são extraídos os valores de pesos e evidências para cada uma das nove transições identificadas. Fundamentado no teorema de probabilidade condicional de Bayes, o método de pesos e evidências calcula a probabilidade de transição a partir da sua vizinhança, ou seja, esse método basicamente indica a probabilidade de ocorrência de uma transição $i \rightarrow j$ (exemplo: floresta para agricultura) devido à evidência de uma variável estatística forçante (exemplo: estradas) sendo cal as equações 18, 19, 20 e 21.

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/D\}} \quad (\text{Equação 18})$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^+ \quad (\text{Equação 19})$$

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/D\}} \quad (\text{Equação 20})$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^- \quad (\text{Equação 21})$$

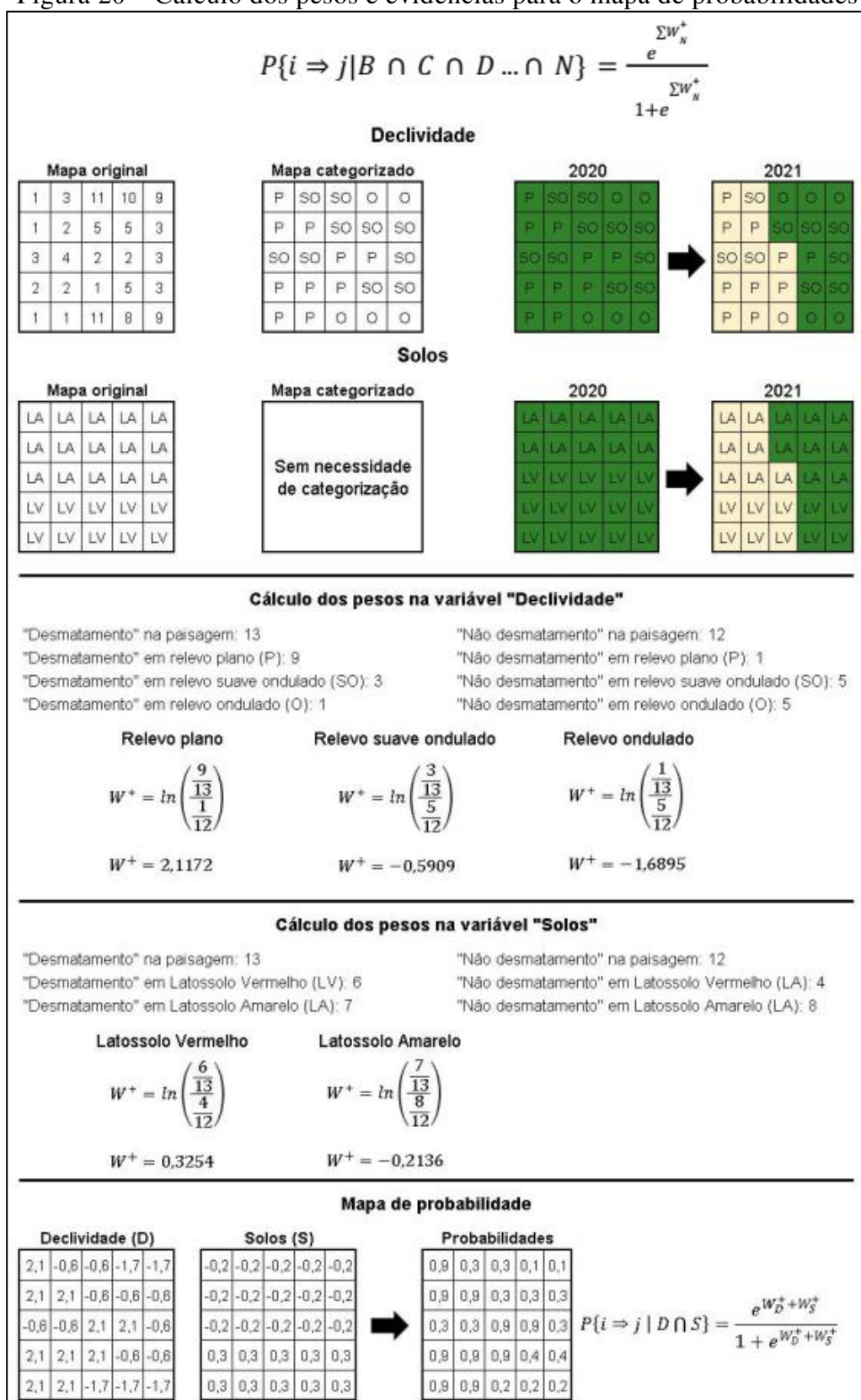
Onde $O\{D\}$ e $O\{D/B\}$ correspondem respectivamente à chance de ocorrer a priori o evento D e de ocorrer D dada a existência de um padrão B (variável explicativa).

Na equação 19 o W^+ corresponde ao peso de evidência positivo e na equação 21, o W^- é peso de evidência negativo de que ocorra o evento D , dado um padrão espacial B . A probabilidade a posteriori de uma transição $i \rightarrow j$, utilizando-se k variáveis espaciais (ex: distância dos rios, rodovias etc.), ou seja, mais de um padrão espacial é expresso pela equação 22 (Almeida, 2004; Soares-Filho *et al.*, 2007; Andrade *et al.*, 2016).

$$P(i \Rightarrow j(xy)/V) = \frac{e^{\sum k W^{kn_{i \rightarrow j(V)xy}}}}{1 + \sum i j e^{\sum W^{kn_{i \rightarrow j(V)xy}}}} \quad (\text{Equação 22})$$

Em que V refere-se a um vetor de k variáveis espaciais, medidas nas localidades x, y e representadas por seus pesos $W^+K_{1xy}; W^+K_{2xy}, \dots, W^+K_{nxy}$, sendo n o número de categorias de cada variável k . (Soares-Filho *et al.*, 2007). Na figura 20, elaborada por Nogueira (2022), é ilustrado o processo de cálculo dos pesos e evidências entre as variáveis explicativas para cada transição realizada simulada no Dinâmica Ego.

Figura 20 – Cálculo dos pesos e evidências para o mapa de probabilidades



Fonte: Nogueira (2022 p.22)

Conforme Nogueira, 2022 para a aplicação do método Pesos de Evidências deve ser realizada discretização das variáveis em intervalos de classe, pois o cálculo do pesos se dá mediante a ocorrência ou não de uma transição no intervalo analisado (exemplo: transição campos para agricultura distância de estradas a cada 100 metros)⁴⁵, sendo o contraste obtido pela diferença entre os pesos positivos e negativos conforme a equação 23. O nível de confiança dos dados é obtido pela variância do contraste $S^2(C)$ que é calculado na equação 24 e indica se a análise é significativa ou não, com intervalo de confiança de 95%, se $|C| > 1,96 S(C)$.

$$C = W^+ - W^- \quad (\text{Equação 23})$$

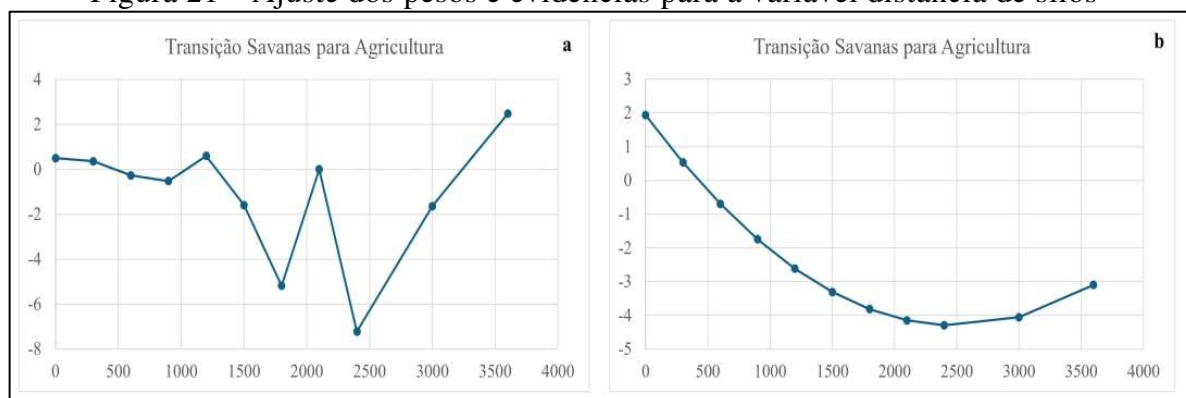
$$S^2(C) = \frac{1}{p(B \cap D)} + \frac{1}{p(B \cap \bar{D})} + \frac{1}{p(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{p(\bar{B} \cap \bar{D})} \quad (\text{Equação 24})$$

Andrade *et al.* (2016) destacam ainda que o contraste também é usado para medir os efeitos de associação e repulsão. Valores positivos, obtidos na equação 23, favorecem a ocorrência de determinada transição em uma determinada faixa da variável estatística analisada. Entretanto, valores negativos repelem a ocorrência da mesma transição, e valores próximos a zero podem ser desconsiderados (não significativos), pois não influenciarão no processo de modelização dinâmica para essa categoria (Soares-Filho, 2009).

Ressalta-se que foi realizado um tratamento estatístico para a remoção dos valores não significativos das variáveis contínuas e dinâmicas, para tanto, analisa-se o padrão de distribuição dos pesos dentro dos limites preestabelecidos e seus respectivos pesos, seguido pela análise da correlação e, por fim, aplicando uma regressão linear utilizando uma equação polinomial do segundo grau, e as variáveis que apresentaram correlação superior a 0,750 não foram submetidas ao tratamento estatístico. Ao final dessa etapa, ocorre alteração nos valores de pesos e evidências (figura 21).

⁴⁵ A indicação de quais covariáveis já se encontram categorizadas, assim como a definição do tamanho dos intervalos, é feita de forma manual, o que indica a necessidade de um conhecimento prévio acerca da natureza e da organização das variáveis escolhidas, e como elas estão envolvidas no processo de mudanças de uma categoria a outra.

Figura 21 – Ajuste dos pesos e evidências para a variável distância de silos*



*transição savanas→agricultura. a-variável sem e com tratamento; b-variável com tratamento

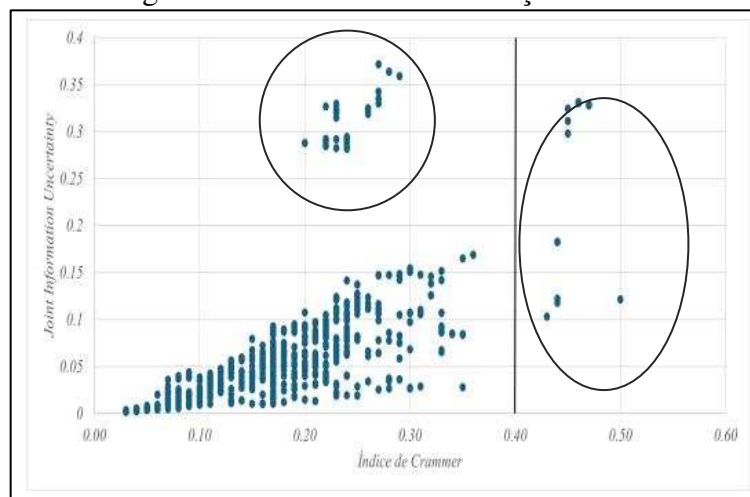
Fonte: dados de pesquisa (2022)

3.6.3 Correlação das variáveis

Como mencionado, o método de pesos e evidências é baseado na probabilidade condicional de ocorrência ou não de transição. Desse modo, é preciso avaliar o nível de independência de cada um dos mapas utilizados, faz-se necessária a aplicação de uma análise de correlação entre as variáveis e os modelos de transição, sendo, em geral, usados os *índices de Crammer* (V), de *Joint Information Uncertainty* (U), para análise do nível de correlação das variáveis (Soares-Filho, 2008; Nogueira, 2022).

Conforme a literatura, tem-se que para valores de U e V superiores a 0,50 alta correlação (alta dependência), e a variável estática que contém a maior quantidade de valores não significativos deverá ser excluída. Entretanto, para valores inferiores a 0,5 considera-se que há uma baixa correlação (baixa dependência), com isso, não há a necessidade de exclusão (Arcoverde, 2014; Andrade *et al.*, 2016; Machado, 2022), conforme a figura 22.

Figura 22 – Análise de correlação U e V



Fonte: dados de pesquisa (2023)

Observa-se na figura 22 que não ocorreu nenhuma variável com taxa de correlação maior que 0,5. Desse modo, analisou-se a correlação entre os valores de U e V sendo definidos neste estudo que valores superiores a 0,40 podem ser considerados de elevada correlação, e suprimidos do modelo. Após a análise de correlação e a exclusão das variáveis dependentes, deve-se calcular novamente os coeficientes de pesos e evidências sem as variáveis removidas e segue-se para o processo de simulação e validação (quadro 7) (Andrade *et al.*, 2016).

Quadro 7 – Variáveis com valores superiores a 0,40

Transição		Par de variáveis comparadas		V	U
1	4	Distância para UC	Precipitação*	0.45	0.31
1	4	Geologia*	Solos	0.44	0.18
1	5	Distância para UC	Precipitação*	0.45	0.32
1	5	Geologia*	Solos	0.44	0.18
1	6	Distância para UC*	Precipitação	0.45	0.30
1	6	Geologia*	Solos	0.44	0.18
2	4	Distância para UC	Precipitação*	0.46	0.33
2	4	Geologia*	Solos	0.44	0.18
2	5	Distância para UC	Precipitação	0.47	0.33
2	5	Distância para silos	Distância para 6*	0.43	0.10
2	5	Geologia*	Solos	0.44	0.18
2	6	Distância para UC	Precipitação*	0.47	0.33
2	6	Geologia*	Solos	0.44	0.18
3	4	Distância para UC	Precipitação*	0.47	0.33
3	4	Distância para silos	Distância para Silvicultura*	0.44	0.12
3	4	Geologia*	Solos	0.44	0.18
3	5	Distância para UC	Precipitação*	0.46	0.33
3	5	Distância para silos*	Distância para 6	0.5	0.12
3	5	Geologia*	Solos	0.44	0.18
3	6	Distância para UC	Precipitação*	0.47	0.33
3	6	Distância para silos*	Distância para Silvicultura	0.44	0.12
3	6	Geologia*	Solos	0.44	0.18

*Variáveis removidas do modelo para cada transição analisada, a escolha considerou o número de ocorrências de valores não significativos para a transição, definindo-se assim a variável de maior importância para a análise.

1 → Formações Florestais; 2 → Formações Savânicas; 3 → Formações Campestres; 4 → Pastagens;

5 → Agricultura; 6 → Silvicultura

Fonte: dados de pesquisa (2023)

5.6.4 Aplicação do modelo de Simulação

Após a etapa de calibração do modelo (ajuste dos pesos e evidências para cada transição), são definidas as taxas de probabilidade de alocação de transição $i \rightarrow j$ que atuam

para formar novas áreas de transição, definidas segundo as funções *expander* e *patcher*. A função *expander* dedica-se unicamente à expansão ou contração de manchas de uma determinada classe, já a função *patcher* é responsável por formar novas manchas (Soares-Filho, 2008; Nogueira, 2022).

Soares Filho *et al* (2007) enfatiza que ambas as funções atuam para a criação do mapa de probabilidade de transição, e esse é parametrizado conforme quatro dados de entrada, sendo a taxa de alocação de pixel, na qual se define o percentual de transição entre classes; a isometria que consiste em um valor que pode variar entre 1 e 2^{46} e determina a regularidade das distâncias entre as manchas criadas; a variância e o tamanho médio das manchas referentes às transições analisadas entre os mapas inicial e final.

Para a função *expander* definiu-se que 90% das células se expandiriam a partir de áreas preexistentes, pois que as novas áreas devem se expandir a partir de áreas agrícolas consolidadas. Para as transições que criarão Pastagem, o valor de *expander* variou entre 70% e 80%. Nas transições que criarão Floresta Plantada (silvicultura) essa taxa ficaria entre 80% e 90% das células. Já a isometria, tanto da função *patcher* quanto da *expander*, utilizada foi de 1,5, resultando em fragmentos mais isométricos do que lineares, com todos esses valores definidos empiricamente.

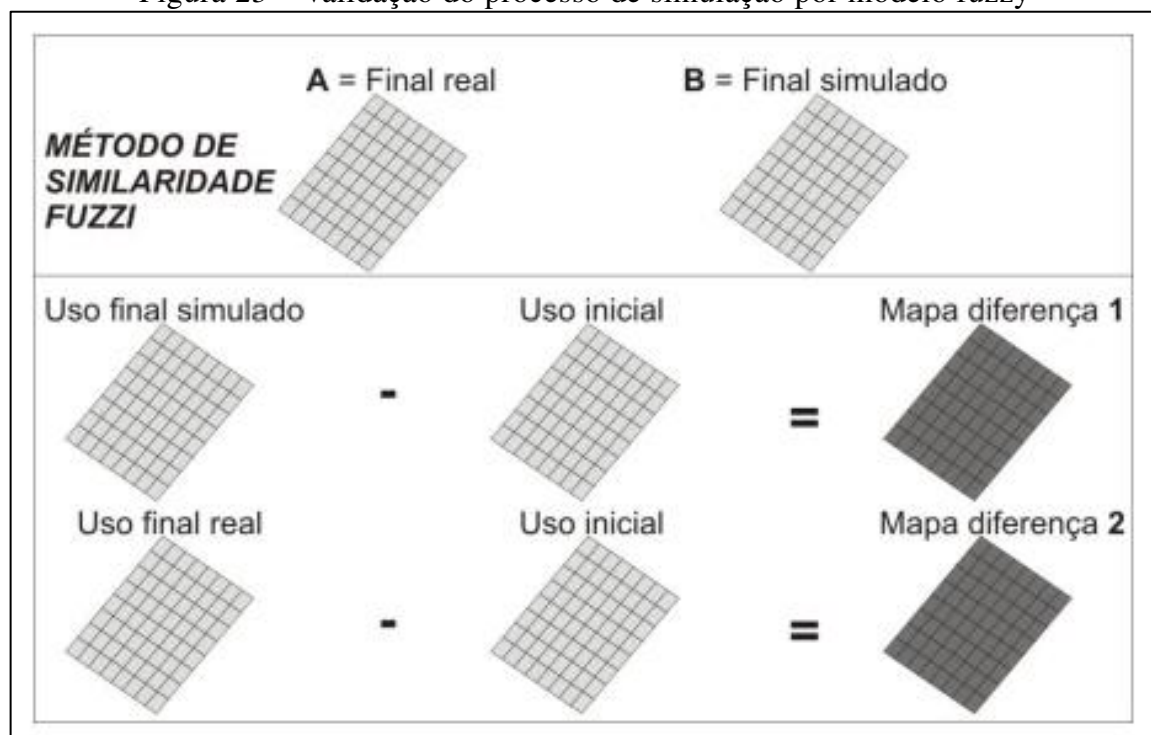
O tamanho dos novos fragmentos foi calculado conforme a área mapeada. Portanto, seu tamanho médio e variância foram definidos como 1 e 10 hectares, respectivamente, equivalentes a 12 e 120 células, e essa etapa é realizada a partir de inspeção visual no Qgis, e pro cálculo de área utilizando informações referentes ao padrão de área média de cada valor de classe mudada entre o período analisado.

5.6.5 Validação do modelo

Após a etapa de simulação foi realizado o processo de validação do modelo. Essa tem como intuito verificar se o modelo reflete ou não a realidade mapeada entre o ano final e o inicial. O método utilizado pelo Dinâmica Ego nessa etapa é o de similaridade *Fuzzy*. Criado por Hagen (2003), a validação do modelo é obtida a partir da diferença entre os mapas inicial e simulados e inicia e observado (figura 23). Além disso, o teste aplicado para avaliação dos mapas não é feito pixel a pixel e, sim, por resoluções múltiplas de janelas (Andrade *et al.*, 2016).

⁴⁶ Valores próximos a 1 tendem a ter distâncias mais regulares que os valores próximos a 2

Figura 23 – Validação do processo de simulação por modelo fuzzy



Fonte: Benedetti, 2010

Os valores *Fuzzy* são obtidos a partir da distância da célula central até a célula que contém a classe em questão, na janela de comparação, fazendo uso de uma função e decaimento constante ou exponencial (Delaneze, 2011; Macedo *et al.*, 2018). Após o processo de validação, aplicando-se a função de decaimento constante, considerou-se que os valores obtidos para mínima similaridade superiores a 0,40 em janelas com resoluções que variam de 1x1, 3x3, 5x5, 7x7 e 11x11 que são aceitáveis pela literatura analisada. Dado o resultado nesta etapa como satisfatório, pode-se então aplicar a simulação de predição futura do uso e cobertura da terra, conforme o modelo de simulação.

3.6 Aspectos ambientais

A mesorregião Sul Maranhense tem seu embasamento geológico predominantemente sedimentar, composto por rochas da Província Sedimentar do Parnaíba⁴⁷, um grande setor de deposição de 600.000 km², formado por quatro sítios deposicionais⁴⁸ de

⁴⁷ A Província sedimentar do Parnaíba tem sua formação associada a maciços arqueanos (Granja e Goiás), crátons sinbrasilianos (São Luís e Núcleo Cratônico Central), cinturões orogênicos brasileiros (Gurupi, Araguaia e terrenos da Província Borborema) (BRITO; NEVES, 1998). E encontra-se localizada nos estados do Maranhão, Piauí e parte do Tocantins, Pará e Ceará, limitando-se ao norte pelo Arco Ferrer (Arco São Vicente Ferrer–Urbano Santos–Guamá); a leste pela Falha de Tauá; a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu; a oeste pelo Lineamento Tocantins–Araguaia; e a noroeste pelo Arco Tocantins (Góes, 1995).

⁴⁸ Góes (1995) destaca que a primeira é do tipo IF/IS (Fratura Interior/Depressão Interior), a segunda do tipo IF (Fratura Interior), a terceira do tipo MS (Depressão Marginal) e a quarta do tipo IS (Depressão Interior). Iniciaram o

gêneses distintas: i) Bacia Sedimentar do Parnaíba (Siluriano-Triássico); ii) Bacia Sedimentar do Alpercatas (Jurássico-Eocretáceo); iii) Bacia Sedimentar do Grajaú (Cretáceo); iv) Sub-Província Sedimentar Mosquito-Sardinha⁴⁹, os quais encontram-se sobrepostos em setores por sedimentos pertencentes a Coberturas Cenozoicas Indiscriminadas, nas quais incluem os Depósitos Aluviais e Coluviais, além de um pequeno setor, onde se encontram rochas do Cráton do São Francisco (Góes, 1995; Bandeira, 2013; Batistela *et al.*, 2013; IBGE, 2019).

As diferentes tipologias litológicas são compostas por rochas de diferentes ciclos, onde predominam arenitos parcialmente silicificados, com níveis de siltitos e folhelhos, sílex e outros compostos cimentantes de maior durabilidade, mesclados por intercalações de calcário e arenitos de maior suscetibilidade erosiva, conglomerado petromítico, que se encontram sobrepostas sobre sequências de arenitos de granulometria variada, calcários, siltitos, conglomerados e folhelhos, xistos e argilitos.

as Formação Piauí, Formação Pedra de Fogo, Formação Motuca e Formação Sambaíba (Grupo Balsas⁵⁰); Formação Mosquito, Formação Pastos Bons e Formação Corda (Grupo Mearim⁵¹); Grupo Itapecuru, Além de Coberturas Cenozoicas recentes, que incluem Depósitos Aluvionares Holocênicos, Depósitos Coluviais Pleistocênicos e Coberturas Lateríticas Paleogênicas (Lima; Leite, 1978; IBGE, 2009). (IBGE, 2009; CPRM, 2013).

A figura 24 e quadro 8 mostram a distribuição espacial e as características mineralógicas de cada unidade geológica da mesorregião Sul Maranhense.

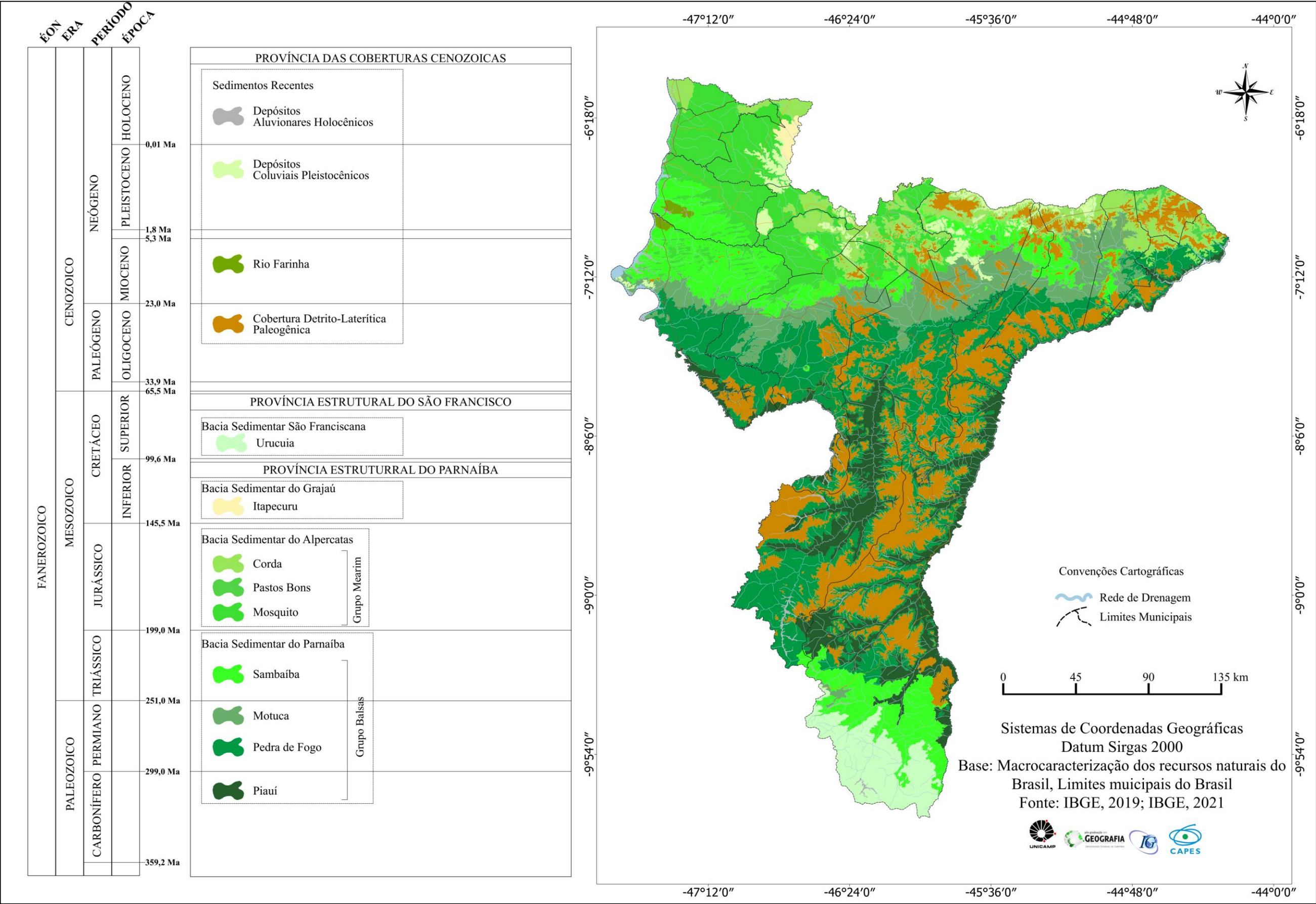
processo de deposição no Paleozoico (Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera e Neocarbonífera-Eotriássica), e duas foram depositadas no Mesozoico (Jurássica e Cretácea).

⁴⁹ A classificação realizada pelo IBGE (2020) desmembra essa unidade das Bacias Sedimentares de Alpercatas e de Parnaíba, e forma uma nova subprovíncia Mosquito Sardinha, a parte vulco-plutônica sendo es

⁵⁰ O grupo Balsas corresponde ao terceiro grande ciclo sedimentar da bacia do Parnaíba, formada por uma sequência Carbonífero-Triássica, para reunir o complexo clástico-evaporítico, sobreposto em discordância.

⁵¹ De acordo com Lima (1995), o Grupo Mearim foi proposto por Lisboa (1914) e posteriormente por Aguiar (1969) para englobar as formações Mosquito, Pastos Bons, Corda e Sardinha, ocupando o intervalo compreendido entre o Neotriássico (Formação Mosquito) e o Eocretáceo (Formação Sardinha), sendo caracterizado como um conjunto de depósitos sedimentares e vulcânicos.

Figura 24 – Geologia da mesorregião Sul Maranhense

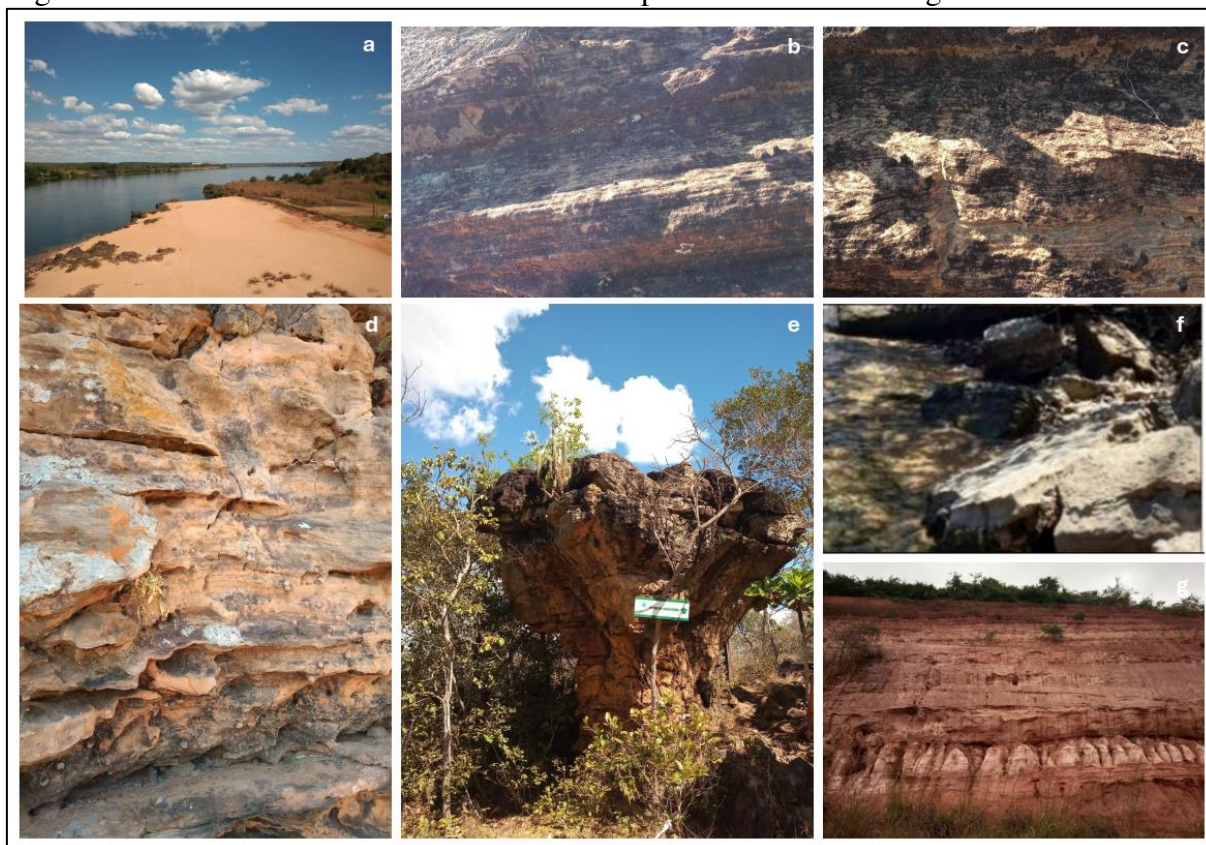


Quadro 8 – Unidades geológicas da Mesorregião Sul Maranhense

ÉON	ERA	PERÍODO	ÉPOCA			UNIDADE	Litoestratigrafia	Área (km²)	%					
FANEROZOICO	Cenozoico	Neógeno	Holoceno	0,01 Ma	Provincia das Coberturas Cenozoicas	Sedimentos Recentes	Depósitos Aluvionares Holocênivo	Depósitos grossos a conglomeráticos de residuais de canal, arenosos relativos a barra em pontal, pelíticos representando âqueles de transbordamento e fluviolacustres eólicos quando retrabalhados pelo vento	317,25	0,47				
			Pleistoceno				Depósitos Coluviais Plesitocênicos	Sedimentos conglomeráticos e areno-siltosos laterizados, predominantemente de origem colúvio-aluvial, constituindo depósitos de piemonte (tálus e cones aluviais) e/ou de pedimento	1.418,59	2,10				
			Mioceno											
			Oligoceno											
		Paleógeno		23,0 Ma				Formação Rio Farinha	Sequência de leques aluviais expostos em dois grandes segmentos, um no vale do rio Farinha e outro na bacia do rio Feio, representando fácies distal e proximal do depósito	182,46	0,27			
			33,9 Ma 65,5 Ma		Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica	Constitui-se da base para o topo de: zona argilosa caulinitica; zona bauxítica com concreções e lentes gibsiticas; zona ferruginosa concrecionária; zona pisolítica nodular, capeamento argiloso (Latossolos), no topo	12.544,17	18,53						
	Mesozoico	Cretáceo	Superior	99,6 Ma	Provincia Estrutural do Parnaíba	Provincia Estrutural do São Francisco Bacia Sedimentar São Franciscana	Formação Urucuiá	É um pacote essencialmente composto de sedimentos arenosos médios a muito finos com horizontes de siltitos e folhelhos, e descontinuas lentes de conglomerados, caracterizado por elevada atividade eólica e fluvial, no qual destacam-se antigos campos de dunas	2.786,48	4,12				
			Inferior				Formação Itapecuru	Constituída por arenitos de estratificação cruzada de coloração avermelhada ou cinza esverdeada ou esbranquiçada com texturas finas, média a grosseiros, argilosas e intercalações de argilitos e siltitos, com faixas conglomeráticas e/ou argilosa de coloração avermelhada com mosqueados de plintita	238,37	0,35				
		Jurássico		145,0 Ma		Bacia Sedimentar do Grajaú	Formação Corda	Constituída de arenitos vermelhos, cremes, amarelados, róseos e arroxeados, com leitos de calcita e intercalações de siltitos, com estratificação cruzada e grãos bem selecionados e arredondados, que descansam discordantemente sobre os basaltos da Formação Mosquito, e sobrepostos discordantemente por arenitos e folhelhos das formações Grajaú e Codo	4268,51	6,31				
			Formação Pastos Bons				Corresponde a uma unidade litoestratigraficamente de folhelhos basais e arenitos, siltitos dispostos entre as formações Mosquito e Corda	204,63	0,30					
			Formação Mosquito				São essencialmente de derrames basálticos amigdaloidais com intercalação sedimentar de arenitos, parcialmente silicificados, com estratificação plano-paralela ou cruzada, ocorrendo principalmente em terrenos com topografia suave a forte ondulado de altitude entre 125 e 550 metros. Por apresentar em sua composição litológica basaltos e/ou diabásicos. Esta unidade tende a apresentar baixo potencial hidrológico, possuindo de média a alta resistência a processos erosivos.	8396,69	12,40					
			Formação Sambaíba				Composta principalmente por sedimentos arenosos, bem selecionados, bimodal, subangulosos, subarredondados e com estratificação cruzada de grande porte, depositado por sistemas eólicos de ambiente desértico com contribuição fluvial, possui boa permeabilidade, com potencial médio a elevado para o armazenamento hídrico, em geral, em terrenos de variação altimétrica entre 250 e 550 metros de altitude e topografia relativamente plana	8655,02	12,78					
		Triássico		199,6 Ma		Bacia Sedimentar do Parnaíba	Grupo Mearim	Formação Motuca	Folhelhos avermelhados, com lentes de carbonatos e anidrita que recobrem a Formação Pedra de Fogo, esta unidade tem a base constituída de arenitos finos a médios, róseos esbranquiçados, já o topo apresenta folhelhos e siltitos arenosos vermelho-tijolo, com fraturas preenchidas pela aragonita, calcita e barita e níveis de sílica, o processo de sedimentação continental, eólica a fluvial, com influência de um mar interior sob condições áridas, representadas pelos evaporitos	5801,17	8,57			
			Formação Pedra de Fogo					Siltitos, folhelhos, calcários oolíticos e pisolíticos creme e branco, silexitos e principalmente sílex (chert), com presença marcante de restos de madeiras fossilizadas, depositados em ambiente marinho raso. Devido à presença de sílex e outros cimentantes, que dão a essa formação maior resistência a processos erosivos, sendo geralmente encontrados na porção superior dos topos das chapadas e chapadões, esta unidade possui taxa de percolação e fraco potencial hidro geológico	16.020,8	23,66				
		Paleozoico	Permiano					251,0 Ma	Bacia Sedimentar do Parnaíba	Grupo Balsas	Formação Piauí	Constituída essencialmente de arenitos finos a grosseiros, de coloração avermelhada, róseo e amarelada, com níveis de siltitos e folhelhos e intercalações de calcário, com certa suscetibilidade erosiva, ocasionalmente os sedimentos arenosos da seção inferior se fazem iniciar por um conglomerado petromítico, de ambiente deposicional em geral fluvial, com contribuição eólica, clima semiárido a desértico, com breves incursões marinhas	6713,81	9,92
				Carbonífero										

As Formações Pedra de Fogo (Permiano), Sambaíba (Triássico), Mosquito (Jurássico) e Coberturas Dentrito-Lateríticas (Paleógeno), somadas, correspondem a 67,38% de todo o embasamento estratigráfico da área. Os outros 32,22% correspondem a rochas das Formações Itapecuru, Corda, Motuca, Piauí, Pastos Bons e sedimentos aluvio-coluviais (figura 25).

Figura 25 – Diferentes estruturas sedimentares presentes na Mesorregião Sul Maranhense



a-sedimentos inconsolidados (aluvionares) as margens do rio Tocantis em Estreito (MA) retirada em 23 de junho de 2021; b-sedimentos da formação Sambaíba no município de Carolina (MA) fotografia retirada em 27/de junho de 2021; c: rochas da formação Mosquito; d e e: arenitos aflorantes da formação Mosquito Parque Nacional das Chapadas das Mesas em Carolina (MA) fotografia retirada em 13 de fevereiro de 2023; f: rochas aflorantes da formação Pedra de Fogo nas cachoeiras do Itapicuru município de Carolina 23 de fevereiro de 2023; g: Formação Itapecuru, corte em talude na BR 230 Município de Barra do Corda (MA)

Fonte: dados de pesquisa, 2021 e 2023

Pontua-se que os terrenos mais antigos correspondem à rochas do Grupo Balsas - formações Piauí (Carbonífero), Pedra de Fogo, Motuca (Permiano) e Sambaíba (Triássico)—, essas unidades afloram em grande parte da porção sul e centro da área (municípios de Balsas, Carolina, Riachão, São Raimundo das Mangabeiras, Loreto e Alto Parnaíba), são predominante compostas de arenitos e argilitos, além de presença material de silicatos de diferentes ciclos geológicos, ocorrendo em terrenos de altitude variável, topografia alternando entre plano a forte ondulada, além de antigos leitos de inundações, chapadas, chapadões e vales encaixados que caracterizam o perfil geomorfológico da área (Góes, 1995; Bandeira, 2013).

As rochas pertencentes ao grupo Mearim (Formação Mosquito, Corda e Pastos Bons⁵²) distribuíram-se em grande parte na porção noroeste da área (entre os municípios de Campestre do Maranhão a Fortaleza dos Nogueiras), em geral, compostas de arenitos, argilitos e derrames vulcânicos (rochas basálticas), as quais são ocupadas por diferentes atividades socioeconômicas, com maior predomínio de pastagens e silvicultura, mas também observa-se a presença do cultivo da cana-de-açúcar, majoritariamente no município de Campestre do Maranhão.

As Coberturas Cenozoicas Indiscriminadas cobrem cerca de 18% da área, estando, majoritariamente, sobrepostas sobre a formação Pedra de Fogo e, pontualmente, sobre a formação Itapecuru e Sambaíba, com duas unidades distintas: os Depósitos Coluvio-Aluvionares e as Coberturas Dentrito-Lateríticas.

Formados principalmente por sedimentos arenosos Depósitos Coluvio-Aluvionares correspondem a ambientes do tipo terraços de acumulação e planícies antigas (sub-atuais) emersas sob a forma de ilhas, ou ao longo das margens dos rios, canais, furos e lagos. Já as Coberturas Dentrito-Lateríticas cobrem extensas superfícies planas, chapadas e chapadões, encontradas principalmente na porção central e sul, desde os municípios de Alto Parnaíba até São Domingos do Azeitão, além de aflorarem pontualmente sobre patamares da Formação Mosquito em Carolina, sendo, em geral, terrenos utilizados para expansão da agricultura mecanizada (IBGE, 2019).

No norte da área encontram-se rochas do grupo Itapecuru, que recobrem os topos de colinas e tabuleiros de média altitude, pontualmente localizadas entre os municípios de São João do Paraíso, Lajeado Novo, São Raimundo das Mangabeiras, Loreto, São Félix de Balsas e Sambaíba. No extremo sul do município de Alto Parnaíba, afloram rochas do grupo Urucuaia, que pertencem à Bacia Sedimentar São Franciscana (IBGE, 2019), segundo a classificação do IBGE (2019).

A área caracteriza-se por um padrão sazonal de precipitação, entre os meses de outubro a abril são registrados os maiores índices de precipitação, já entre os meses de junho a setembro ocorre significativa queda dos índices de precipitação para o local. Na mesorregião Sul Maranhense também são registradas as maiores amplitudes térmicas anuais, com média 15°C, fatores como continentalidade e características de topografia têm significativa influência nos padrões de temperatura (Garcês Junior, 2022).

⁵² Na área observa-se a presença de um pequeno depósito aflorante da Formação Pastos Bons entre os municípios de São Félix de Balsas e Benedito Leite.

No que tange aos agentes responsáveis pelas características de precipitação no local, destacam-se Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), complexos convectivos de mesoescalas (CCM) e vórtices ciclônicos da troposfera superior (VCAS).

Conforme Uvo e Nobre (1989), a ZCIT é um dos mais importantes sistemas meteorológicos que atua nos trópicos e parte integrante da circulação geral da atmosfera, formada pela convergência das massas de ar equatorial atlântica e equatorial continental, que se deslocam em direção ao sul e formam um padrão sazonal de precipitação, estando estacionado no sul do Maranhão entre os meses de outubro a dezembro quando passa a deslocar-se para a porção norte da área.

Para Viegas (2015), a ZCIT tem um deslocamento entre os hemisférios sul e norte, com posição média em torno de 3° a 5° Sul e Norte da linha do Equador. Para os meses de janeiro (verão – HS) e julho (inverno – HS). A interação terra – mar é de grande importância para se entender o posicionamento da ZCIT ao norte e ao sul do Equador, que adentra no estado do Maranhão no sentido noroeste-sudeste, e alcança a porção sul do estado a partir de fevereiro, ocasionando significativas taxas de precipitação até os meses de abril.

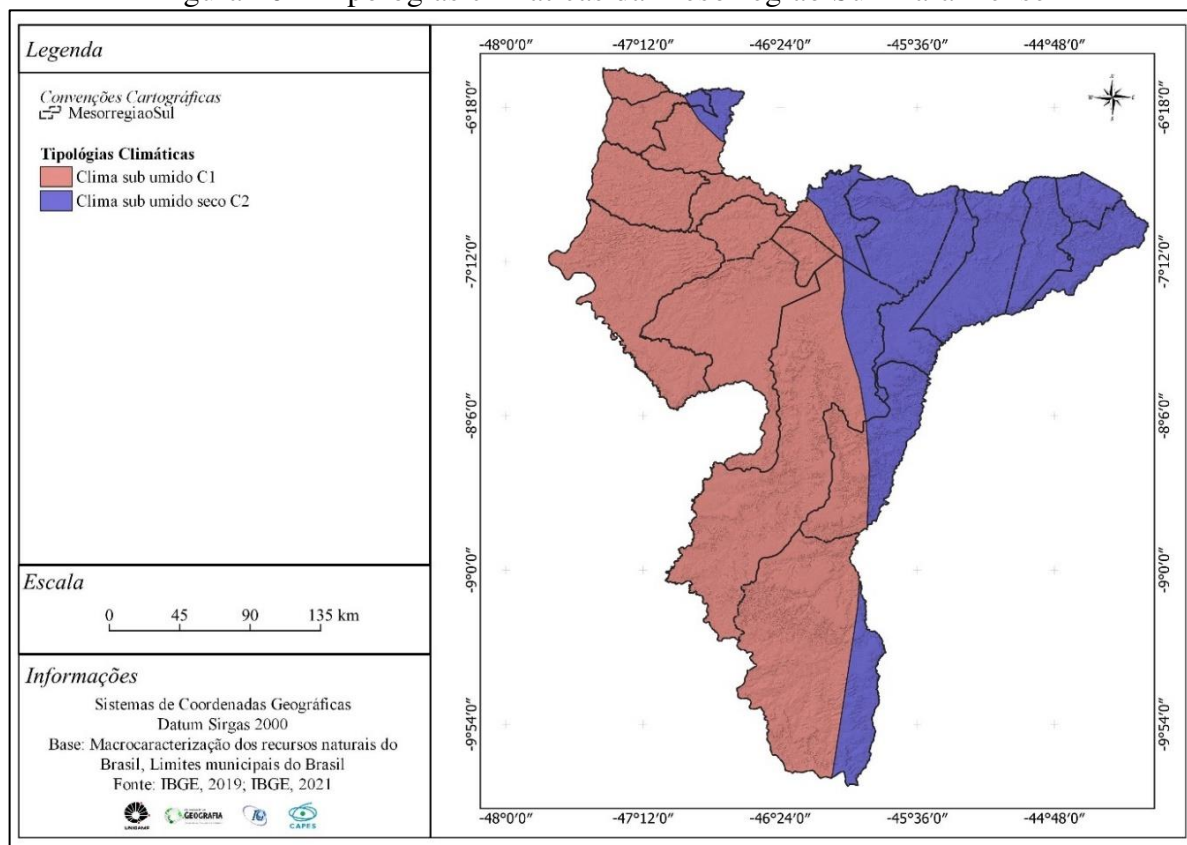
A ZCAS é um arranjo de sistemas atmosféricos que se estabelecem na porção centro sul do Brasil e na estação mais quente, entre novembro e março, formando uma espessa faixa de nebulosidade que se desloca de noroeste para sudeste, saindo da Amazonia e alcançando as partes central e sul do país. No sul do Maranhão essa carga de umidade atua em associação com a presença de vórtices ciclônicos que ocasiona chuvas a partir do mês de outubro estendendo-se até fevereiro, quando se tem as primeiras chuvas vinculadas à ZCIT.

Os vórtices ciclônicos da troposfera superior (VCAS) é um centro fechado de baixa pressão que ocorre em níveis elevados da troposfera, formado no oceano Atlântico Sul e na costa leste brasileira, deslocando-se para oeste, provocando, entre os meses de novembro e fevereiro, chuvas excessivas na porção centro-sul do Maranhão, além do sul do Piauí, oeste da Bahia e oeste de Pernambuco, com acumulados que variam entre 600 mm a 2.000 mm (Garcês Junior, 2022).

Na classificação climática elaborada pelo Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão (NUGEO/UEMA) (MARANHÃO, 2002) e seguidas por Reschke; Eloi; Silva, 2013; e Garcês Júnior (2022), que utilizam a proposta de Thornthwaite (1948), é possível identificar dois tipos climáticos, Úmido e Subúmido, que são divididas em quatro tipologias climáticas: clima úmido B1; clima úmido B2; clima subúmido C2 e clima

subúmido seco C1., onde o municípios que compõem a mesorregião Sul Maranhense se inserem nos climas subúmido seco (C1) e o clima subúmido (C2) (figura 26).

Figura 26 – Tipologias climáticas da Mesorregião Sul Maranhense



Fonte: adaptado de Feitosa e Trovão, 2006

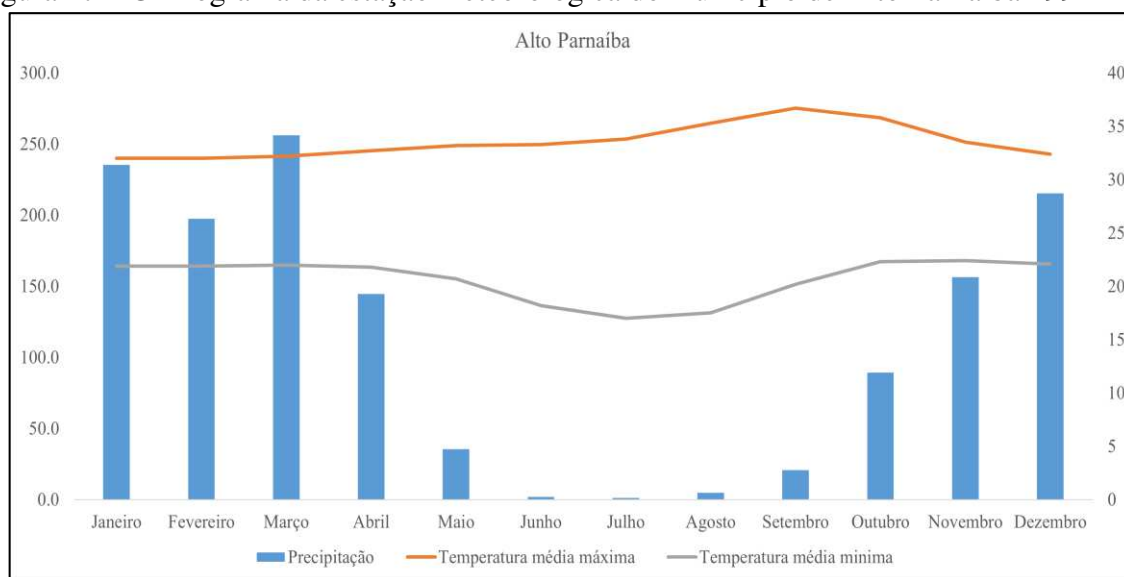
O clima subúmido C2 caracteriza-se como megatérmico, com alta pluviosidade, moderada deficiência hídrica, e evapotranspiração potencial de verão de 24,6%, onde se tem a ocorrência de dois períodos distintos: estiagem entre os meses de julho a setembro, e o chuvoso, que ocorre entre os meses de outubro a março, período em que as temperaturas apresentam valores acima do 28°C e totais pluviométricos entre 800 e 1.600 mm anuais, além de umidade relativa acima dos 70%, predominando em geral na porção centro-leste da área, nos municípios de São Raimundo das Mangabeiras, Loreto, Sambaíba (Reschke; Eloi; Silva, 2013; Garcês Junior, 2022).

O clima subúmido seco C1 apresenta como características elevadas temperaturas médias anuais, com moderada amplitude térmica e perda de água a partir do mês de junho, com deficiência hídrica de 467 mm de julho a dezembro e reposição hídrica a partir de janeiro, com excedente hídrico de 660. Entre os meses de outubro e março estão concentrados os maiores índices de chuvas, e essa tipologia climática encontra-se predominantemente nos

municípios de Estreito, Riachão, Balsas Alto Parnaíba, Campestre do Maranhão (Reschke; Eloi; Silva, 2013; Garcês Junior, 2022).

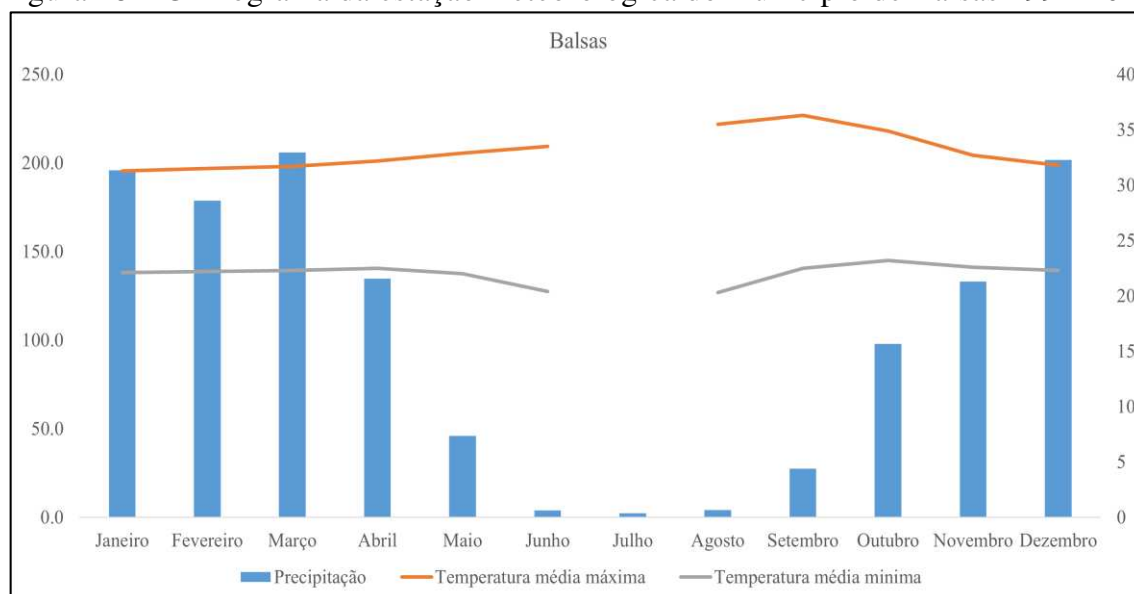
Os climogramas das figuras 27, 28 e 29 apresentam os padrões mensais de temperatura e precipitação conforme a normal climatológica de 1991-2020, para as estações meteorológicas dos municípios de Alto Parnaíba, Balsas e Carolina respectivamente, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

Figura 27 – Climograma da estação meteorológica do município de Alto Parnaíba 1991-2020



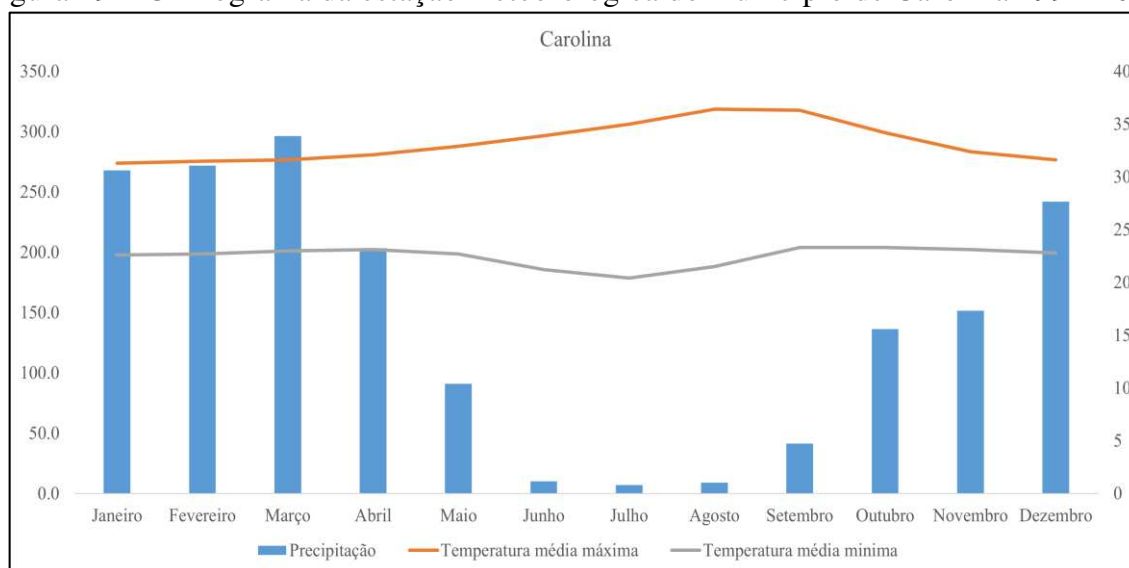
Fonte: adaptado de Inmet, 2022

Figura 28 – Climograma da estação meteorológica do município de Balsas 1991-2020



Fonte: Adaptado de Inmet, 2022

Figura 29 – Climograma da estação meteorológica do município de Carolina 1991-2020



Fonte: INMET (2022)

A mesorregião Sul Maranhense apresentou valores de temperatura entre 17° (mínima média em Alto Parnaíba) e 36,7°C (máxima média em Alto Parnaíba). As maiores temperaturas foram observadas entre os meses de agosto a novembro, variando entre 34° e 36,9°C, e esse período se destaca também pela maior perda de água, com significativa escassez hídrica e nível de umidade não ultrapassando os 60% (INMET, 2022).

Considerando toda sazonalidade anual, de janeiro a dezembro, a área apresentou um acumulado de chuva entre 1.200 mm (Balsas) e 1.700 mm (Carolina), tendo os maiores acúmulos de precipitação entre os meses de dezembro a abril, com níveis de pluviosidade de 175 mm (dezembro), 195,9 mm (janeiro) e 235,4 mm (abril).

Sobre o acúmulo de chuvas na área Garcês Junior (2022) destaca que:

Na porção sul do estado as chuvas iniciam em outubro, como observa-se em Balsas e Carolina. Nestas duas estações o mês mais chuvoso é março com 256,3 mm (Alto Parnaíba) e 206 mm (Balsas), mas cabe ressaltar que em dezembro os volumes superam os 200 mm nas duas estações. Na porção leste, as estações de Colinas e Caxias possuem acumulados anuais de 1.517,9 mm e 1.315 mm, sendo o período mais chuvoso entre janeiro e abril e mais seco entre julho e setembro (GARCÊS JUNIOR, 2022 p. 86)

A partir do mês de maio, observa-se redução gradativa nos índices de precipitação, com os menores volumes de pluviosidade registrados nos meses de junho, julho e agosto, variando de 1 mm (julho, estação de Alto Parnaíba) a 10mm (junho, estação de Carolina).

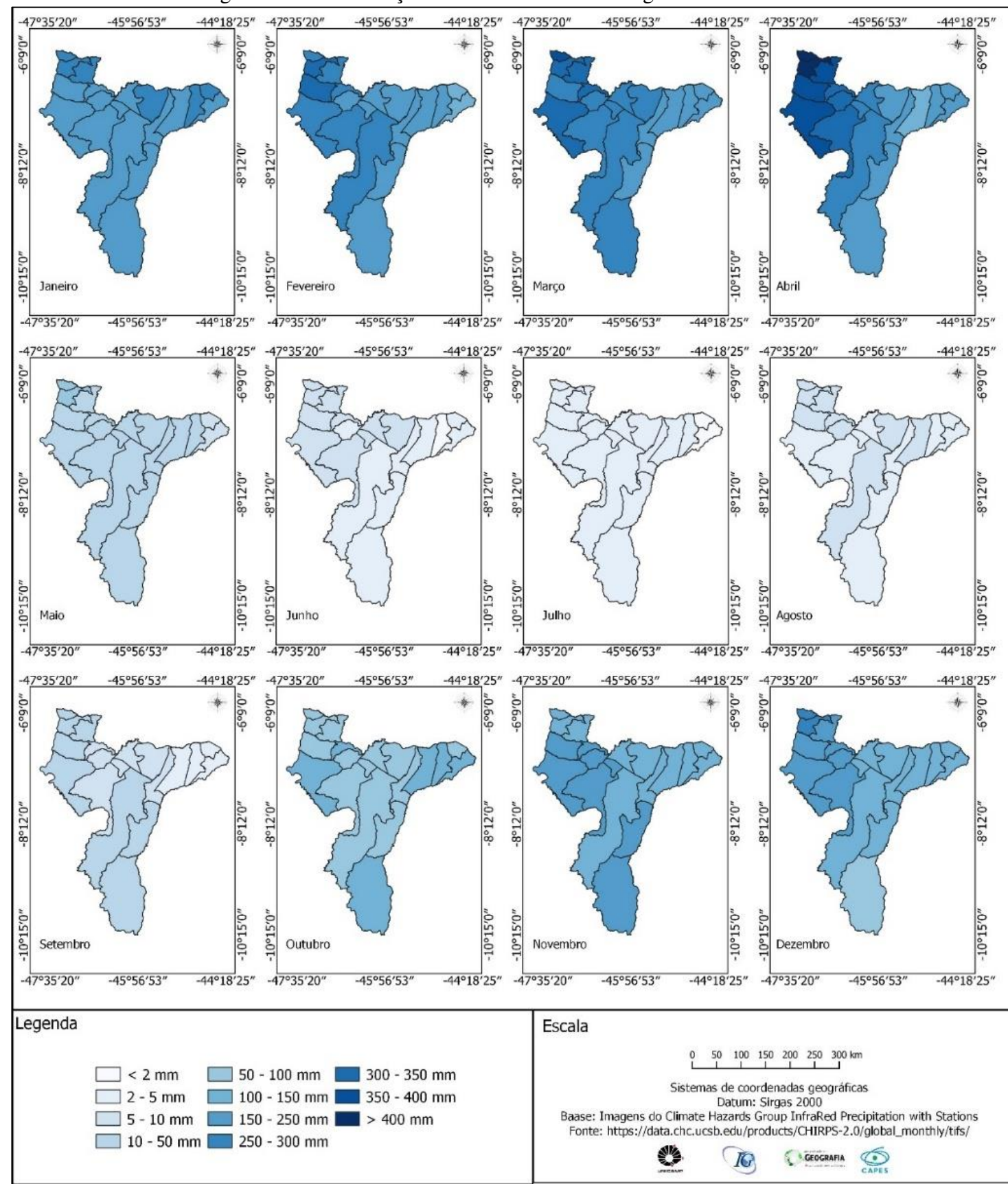
Já na análise de distribuição da precipitação por município, optou-se pelo uso do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS), um produto de precipitação baseado

em grade de satélite de longo prazo, com resolução espacial de 1 km, que mostrou estreita correlação com os dados oriundos dos dados disponíveis pelo INMET (88% com a estação de Alto Parnaíba e 91% com as estações de Balsas e Carolina).

Esse dado corrobora com valores encontrados por Garcês Junior (2022) quando analisou a correlação entre dados de estações pluviométricas das doze estações presentes para o estado do Maranhão e os valores de precipitação extraídos do CHIRPS entre os anos de 1991 e 2020, com correlação de dados entre valores de 0,71 (Balsas), 0,78 (Alto Parnaíba) e 0,81 (Carolina).

Desse modo, a distribuição espacial das chuvas indicou um direcionamento sul-norte, com maior acumulado no município de Alto Parnaíba no mês de outubro, com taxas de 132 mm (Alto Parnaíba), direcionando-se para a porção norte da área, com as maiores taxas a partir de fevereiro ocorrendo nos municípios de Campestre do Maranhão, Estreito, Porto Franco Feira Nova e São João do Paraíso, região de contato com bioma amazônico (figura 30).

Figura 30 – Distribuição das chuvas na Mesorregião Sul Maranhense



Fonte: Adaptado de Garcês Junior (2022)

Como já mencionado, na porção sul do estado do Maranhão, o período chuvoso inicia-se no, e as maiores taxas de precipitação concentraram-se entre os meses de dezembro a abril, com índices variando entre 150 mm e 430 mm. O mês mais chuvoso foi abril, com precipitação média de 425 mm em Porto Franco, 412 mm em Campestre do Maranhão e 388 mm em Estreito, já as menores taxas estão nos municípios de Sambaíba e Loreto com 157 mm e 140 mm, respectivamente.

As chuvas apresentaram redução significativa da precipitação a partir do mês de maio, com os menores valores registrados nos municípios de São Domingos do Azeitão (5,57 mm) e Benedito Leite (6,82 mm), já as maiores taxas são 56,99 mm (Campestre do Maranhão) e 50,65 mm (Porto Franco). Os meses de junho, julho e agosto concentraram os menores índices de precipitação, com os municípios de São Félix de Balsas (1,75 mm em junho) e Benedito Leite (0,94 mm em julho e 2,49 mm em agosto) apresentando os menores valores de precipitação. Nesse período, as maiores taxas foram registradas em Campestre do Maranhão (7,14 mm em junho e 7,54 mm em agosto) e Estreito (4,23 mm em julho).

O relevo da mesorregião Sul do Maranhão caracteriza-se por extensas superfícies de aplainamento mescladas por um conjunto de feições tabulares residuais (chapadas e chapadões) de variadas altitudes, em grande parte sustentado por rochas paleozoicas e mesozoicas da Província Sedimentar do Parnaíba, intercaladas por colinas suavemente onduladas, sobrepostas por amplos vales encaixados, onde se destacam significativas áreas de depressões, além de amplas planícies fluviais dos rios Balsas, Tocantins, Parnaíba e outros cursos d'água (Dantas, *et al.*, 2013; IBGE, 2019).

A área caracteriza-se em geral por antigas superfícies planálticas, intensamente entalhada e fragmentada pela ação dos agentes exógenos, resultando em uma sucessão de morros testemunhos, mesas, mesetas e platôs isolados, intercalados por significativas superfícies de aplainamentos, desenvolvidas por intermédio do recuo lateral das escarpas de borda de chapadas, além de frequente ocorrência de níveis de base locais (figura 31) (Dantas *et al.*, 2013; Batistela *et al.*, 2013).

Figura 31 – Feições de relevo da mesorregião Sul maranhense



a e b: relevo testemunho so chapadas e planos do rio Farinha em Carolina (MA) fotografia tirada em 11 de fevereiro de 2023; c: superfície plana do tabuleiro de Balsas, Balsas (MA) fotografia adquirida em 13 de fevereiro de 2023; d, e, f: superfícies suavemente onduladas mescladas por chapadas e mesetas entre os municípios de Estreito (MA) e Carolina (MA) fotografias adquiridas nos dias 13 e 14 de fevereiro de 2023; g, h, i vista parcial da serra do penitente entre os municípios de Balsas (MA) e Tasso Fragoso (MA) fotografias adquiridas entre os dias 18 e 23 e fevereiro de 2023

Fonte: dados de pesquisa, fevereiro 2023

No que diz respeito às condições de altimetria, a mesorregião Sul Maranhense apresentou amplitude altimétrica de 684 metros e média de 368 metros, as menores altitudes estão representadas por cotas entre 123 e 230 metros, e as maiores altitudes corresponderam a setores entre 730 e 814 metros (tabela 5 e figura 32).

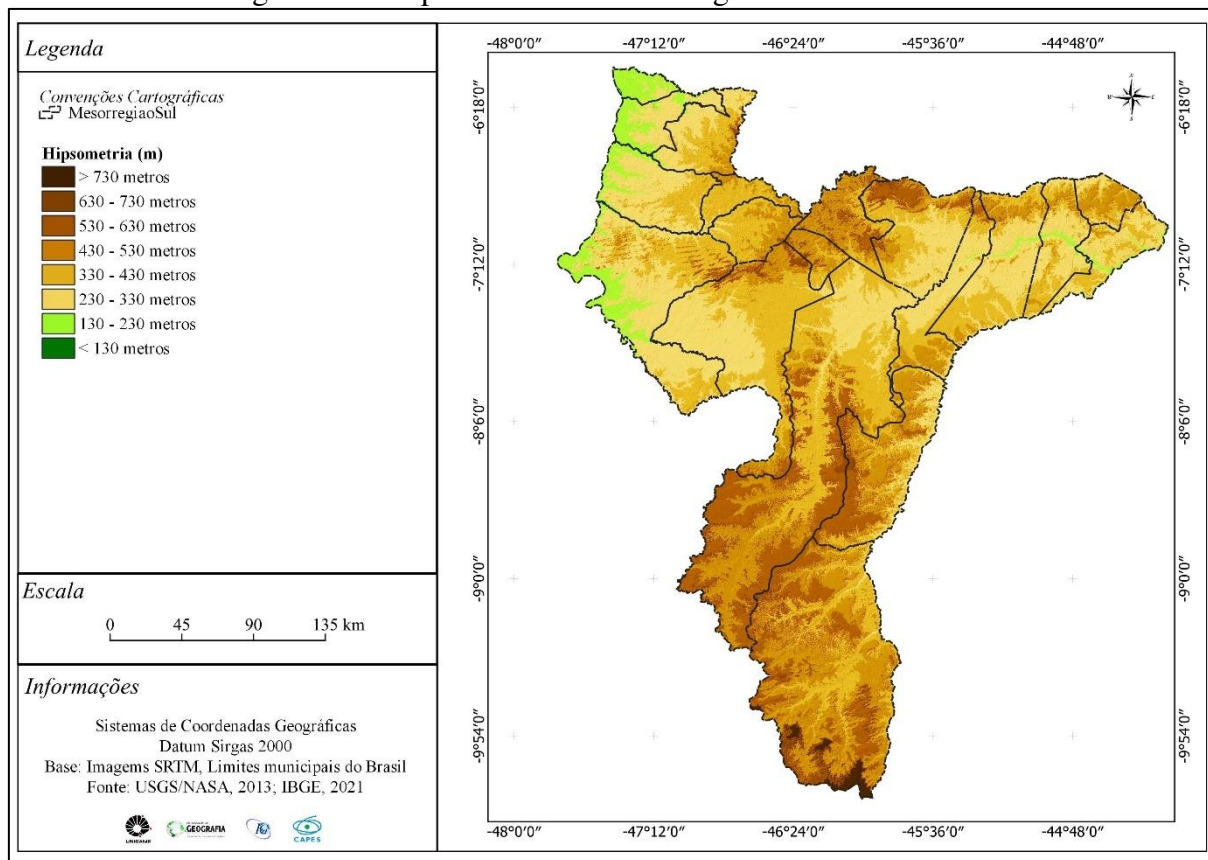
Tabela 5 - Compartimentação hipsométrica da Mesorregião Sul Maranhense*

Compartimentação	Área	%
< 130	17,37	0.03%
130-230	6.797,33	10.04%
230-330	22.012,56	32.52%
330-430	18.048.51	26.67%
430-530	15.597,53	23.05%
530-630	4.549,38	6.72%
630-730	442,69	0.65%
> 730	214,00	0.32%

*Para a caracterização da hipsometria da área, optou-se pela compartimentação em oito níveis topográficos com variação altimétrica de 100 metros

Fonte: dados de pesquisa, 2021

Figura 32 – Hipsometria da Mesorregião Sul Maranhense



Fonte: dados de pesquisa, 2020

Predominam os terrenos de altitude entre 230 e 330 metros que correspondem a 32,52% da área. Esses setores encontram-se em grande parte em terrenos relativamente planos mesclados por colinas suavemente onduladas. Já a faixa altimétrica entre 330 a 430 metros correspondem a 26,67% da área. Nesse nível topográfico predominam extensas superfícies de aplainamentos, pontualmente mescladas por feições tabulares testemunhos de maior altitude além de vales entalhados sobre rochas das formações Pedra de Fogo, Mosquito Sardinha.

Os terrenos entre 123 e 230 metros de altitude representam as menores cotas topográficas e abrangem aproximadamente 10,04% do limite territorial da área, e correspondem as planícies e os antigos leitos de inundação dos rios Tocantins, Farinha, Lajeado, Balsas e Parnaíba, que se caracterizam pelo desenvolvimento de superfícies aluvionares mescladas por extensas superfícies suavemente onduladas, onde encontram-se colinas de baixa altitude, tendo como principal atividade econômica a pecuária extensiva em larga escala.

Já os terrenos de altitude superior a 430 metros foram observados pontualmente entre os municípios de Balsas, Alto Parnaíba, Riachão e Chapadas das Mangabeiras. Essa faixa compõe

um conjunto de extensas superfícies tabulares (Mesas e Chapadas), com topos relativamente planos e elevado grau de entalhamento, associado à ação dos sistemas de drenagens presentes na área, que são constituídos principalmente por rochas sedimentares, das formações alúvio-coluvionares e formação Pedra de Fogo.

Tais setores caracterizam-se por uma morfologia relativamente acidentada, levemente adernadas para norte, nos quais situa-se um conjunto de chapadas (chapadas das Mangabeiras, Serra do Penitente Chapada das Mesas) e encontram-se as maiores cotas altimétricas do estado, com mais e 800 m de altitude (Garcês Junior, 2022).

No que tange às condições clinográficas (tabela 6) os terrenos planos corresponderam a mais de 72% de todo limite territorial da área⁵³, os outros 28% são caracterizados por formas de relevo mais acentuadas (superiores a 8%) nos quais se destacam feições de topografia mais íngremes - mesas, mesetas e chapadões e baixas colinas- em geral de topos planos e altitude variada.

Tabela 6 - Declividade da Mesorregião Sul Maranhense

Declividade	Classe	Área km²	Área em %
0 a 3%	Plano	18485,5	27,31
3 a 8%	Suave Ondulado	31071,7	45,91
8 a 20%	Ondulado	12365,5	18,27
20 a 45%	Forte Ondulado	4416,74	6,52
> 45%	Montanhoso	1338,32	1,97

Fonte: adaptado de EMBRAPA (1979)

Na mesorregião se tem o predomínio dos terrenos suavemente ondulados (declividade entre 3 e 8%) que cobrem aproximadamente 45,91% da área, caracterizaram-se por relevo pouco movimentado constituídos em geral, de extensas superfícies aplainadas mescladas por colinas de baixa altitude. Os terrenos planos (declividade entre 0 e 3%) cobrem por volta de 27,31% e caracteriza-se pela baixa variação topográfica, estado em geral associado a antigos leitos de inundação e topos de chapadas e chapadões.

Já as altas declividades – terrenos fortes ondulados (20 a 45%) e montanhoso⁵⁴ (> 45%) – são pouco expressivas na região, e corresponderam a superfícies de vertentes predominantemente movimentada, constituída principalmente de colinas com declive

53 De acordo com Lepsch *et al.* (2015), esta característica de terreno favorece a implantação de atividades agrícolas, como a implantação de culturas temporárias e/ou permanentes, e na microrregião predominou o uso para a inserção de pastagens plantadas e cultivos de cana-de-açúcar e soja.

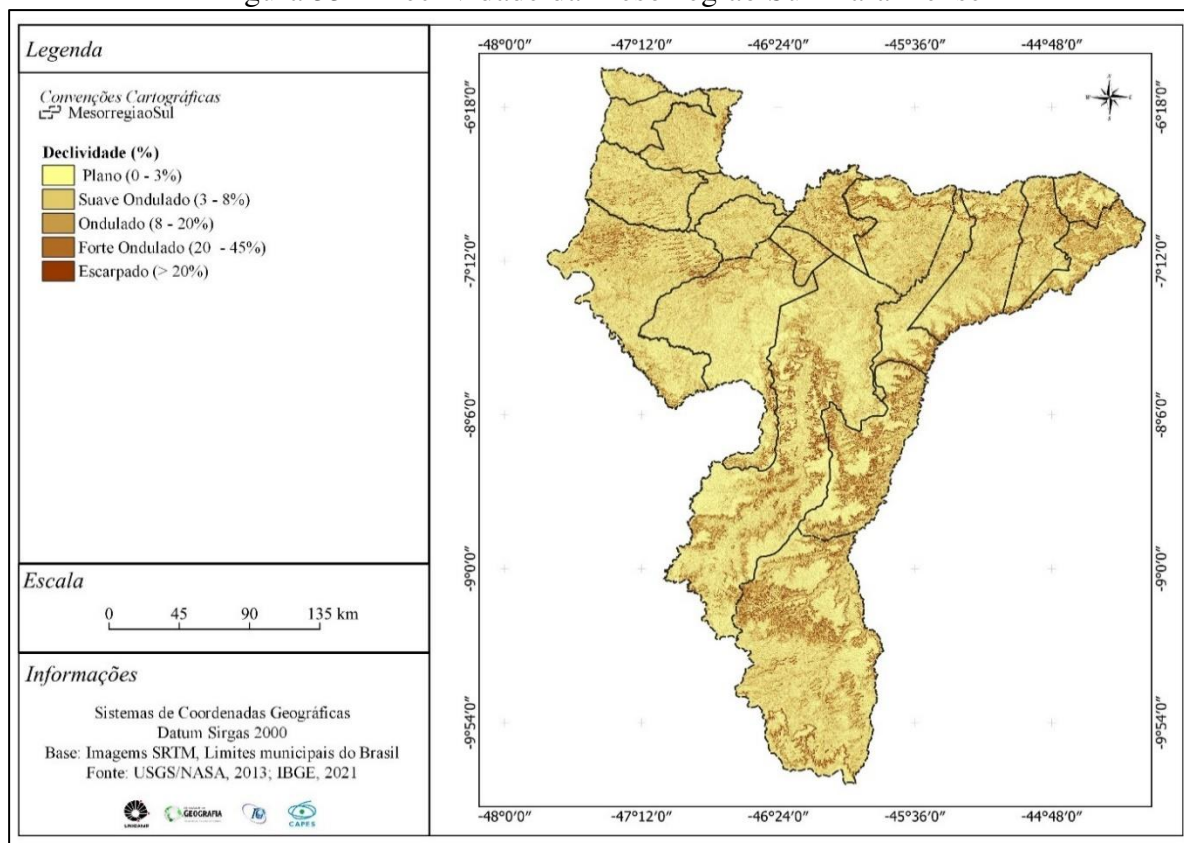
54 Apesar do manual da EMBRAPA (2019) destacar que a declividade caracterizada como montanhoso corresponde a encostas predominantemente acidentada, como montanhas, na área corresponde a vertentes com declividade mais acentuada, de altitude moderadamente elevada, como mesas, mesetas e morros testemunhos.

relativamente moderado, além de superfícies vigorosas, acidentadas, que apresentam queda abrupta, mesas, mesetas e chapadas. Esses terrenos apresentaram altitude variando entre 548 e 668 metros e concentraram-se na porção nordeste e central da área, nos municípios de Carolina, São Pedro dos Crentes e São João do Paraíso.

Os terrenos ondulados (com variação de 8 a 20% de declividade) corresponderam a 6,91% da área, com topografia ligeiramente movimentada, de declives moderados, caracterizados por um conjunto de feições colinosos de altitude variando entre 180 e 250 metros, encontrados principalmente sobre terrenos areníticos das formações Mosquito e Sambaíba.

Na figura 33 é apresentada a declividade da mesorregião Sul Maranhense, na qual percebe-se o predomínio dos terrenos e suavemente ondulados,

Figura 33 – Declividade da Mesorregião Sul Maranhense

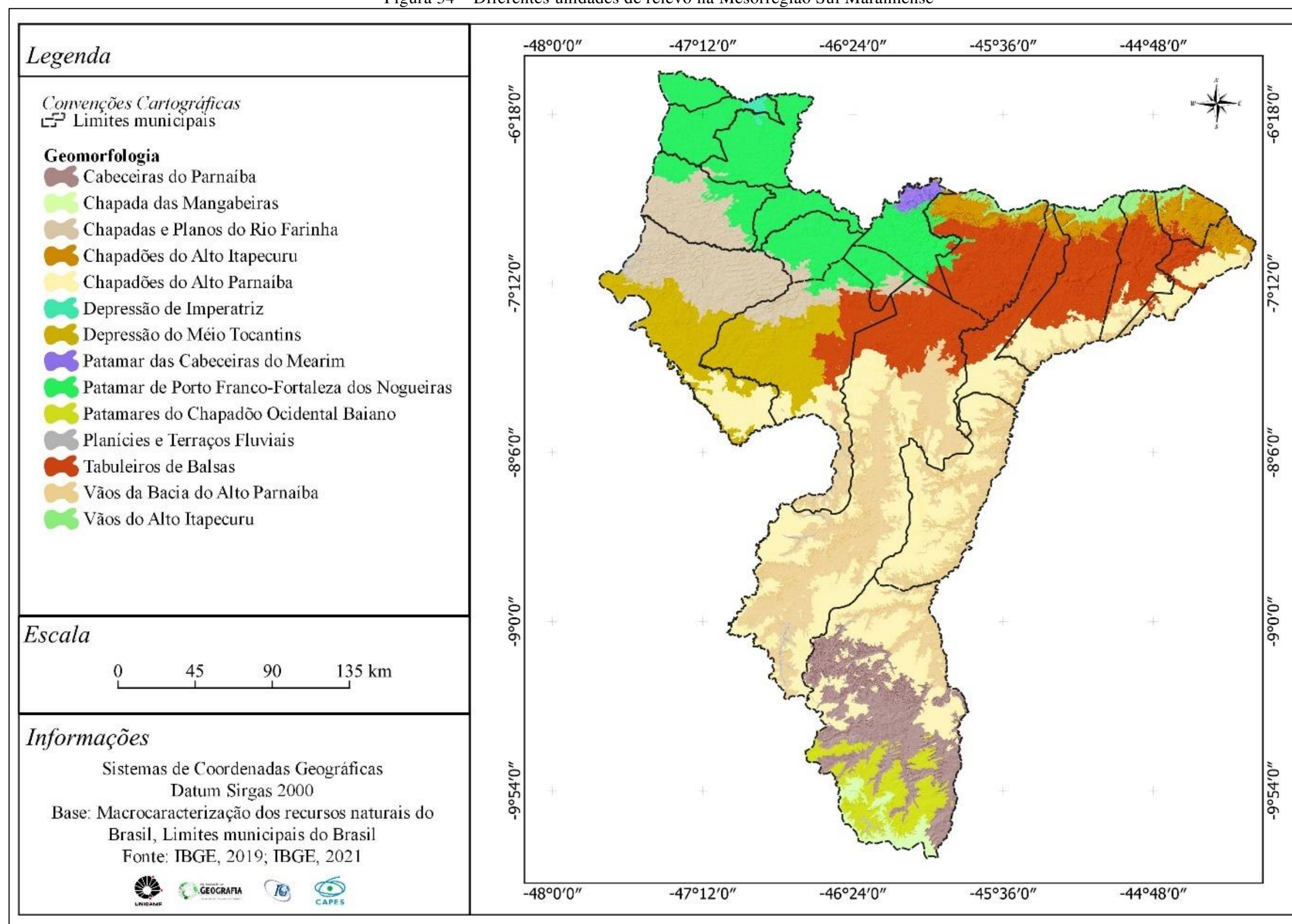


Fonte: Dados de pesquisa (2020)

De acordo com a classificação do IBGE (2019), a área de estudo pode ser dividida nas seguintes unidades de relevo: chapadas, depressões, planícies, tabuleiros e patamar. As áreas de chapadas são caracterizadas por possuir topos planos ou suavemente ondulados, as quais são modeladas em rochas sedimentares, e agrupam as unidades Chapadas do Alto Itapecuru, Chapada

das Mangabeiras, Chapadas e Planaltos do Rio Farinha, e Chapadões do Alto Parnaíba que foram delimitados em IBGE (2013) como apresentados na figura 34.

Figura 34 – Diferentes unidades de relevo na Mesorregião Sul Maranhense



Fonte: dados de pesquisa (2021)

Segundo Garcês Junior (2022), as depressões correspondem a feições onde o relevo é mais rebaixado em relação ao seu entorno e podem ser modeladas em qualquer tipo de rocha. Essa unidade agrupou os Vãos da Bacia do Alto Parnaíba, Depressão do Médio Tocantins e Depressão de Imperatriz, vasta superfície de aplainamento levemente degradada, de topografia variando entre plana a suavemente ondulada e de altitude entre 125 e 350 metros, mescladas pontualmente por uma série de feições residuais de topografia de altitude entre 200 e 500 metros, e amplos vales e planícies fluviais⁵⁵, retocadas por uma rede de drenagem de baixa densidade, todavia, sem perder seu caráter aplainado, com orientação de caimento em geral de leste a oeste, seguindo em direção à calha do Rio Tocantins e Parnaíba (IBGE, 2013).

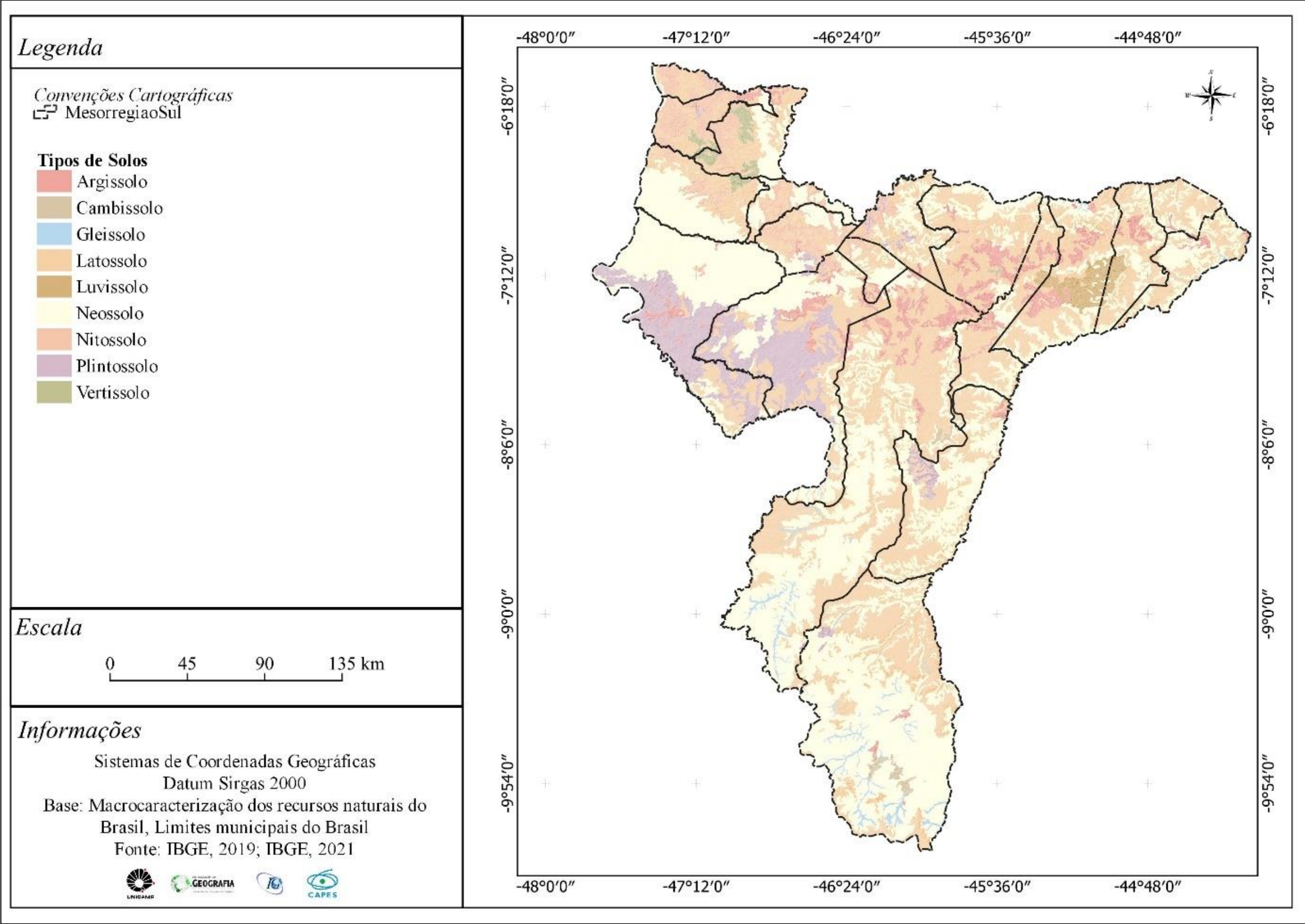
Os patamares correspondem a feições que têm a topografia variando entre plana ou ondulada, caracterizando-se por apresentar um degrau transicional mais elevado entre um planalto, chapada ou serra e mais baixo entre depressões ou planície, destacando-se o Patamar de Porto Franco e o Tabuleiro de Balsas, que são caracterizados por vastas superfícies de aplainamentos mescladas por um conjunto de colinas de baixa altitude, de topografia suavemente ondulada a ondulada, geralmente associadas às formações Mosquito-Sardinha, Motuca e Pedra de Fogo.

As planícies correspondem a feições suavemente planas que ocorrem de forma descontínua ao longo de fundos de vale, com significativa presença de estrangulamentos rochosos, encontrados na área as planícies dos rios Tocantins, Parnaíba, Balsas, Farinha e outros cursos d'água encontrados na área (IBGE, 2019).

Os solos da microrregião da Mesorregião Sul (figura 35) estão associados à litologia sedimentar que caracteriza a área, com o predomínio dos Latossolos e Neossolos, que recobrem respectivamente 39% e 41% de todo o limite territorial da área, e em menor proporção observam-se os Argissolos (5,04%), Nitossolos (4,36%), Plintossolos (7,27), Gleissolos (1,09%) e Luvissolos (1,16%).

⁵⁵ As planícies aluviais encontram-se embutidas em cotas mais baixas, 125 e 175m, e correspondem a antigos terraços fluviais dos rios Tocantins, Manoel Alves Grande, Lageado, Farinha, e pequenos canais encontrados na área.

Figura 35 – Solos da Mesorregião Sul Maranhense



Fonte: adaptado de IBGE (2019)

Os Latossolos⁵⁶ correspondem a solos minerais, não-hidromórficos, profundos, (superiores a 2 metros), com boa drenagem e com sequências de horizontes pouco diferenciados, encontrados principalmente em relevo plano, suavemente ondulado, normalmente com declividade que raramente ultrapassa 7%, podendo ocorrer também em terrenos de declividade mais acentuada (EMBRAPA, 2019), ocorrendo na área os Latossolos Amarelos, Vermelho e Vermelho-Amarelo, todos com caráter distrófico (IBGE, 2019).

Os Neossolos apresentam maior ocorrência na área, sendo encontrados os Quartizarênicos, Litólicos e Flúvicos. Batistela *et al.* (2013) destacam que os Neossolos correspondem a solos minerais, casualmente orgânicos na superfície, hidromórficos ou não, geralmente pouco profundo, onde as somas dos horizontes não ultrapassam os 50cm, essencialmente quartzosos, de textura arenosa a média (Quartizarênicos), ou diretamente sobre a rocha dura ou cascalheira espessa (Litólicos), ou sobre camadas de sedimentos aluviais ou alúvio-coluviais (Flúvicos), ocorrendo em relevo planos e/ou suavemente ondulada, com altitude variada.

Esses solos apresentam grande diversidade morfológica e são bastante heterogêneos em relação à fertilidade e aos atributos físicos, químicos e mineralógicos encontrados nos setores mais declivosos, como vertentes das colinas e chapadas, em geral seus usos estão associados à pecuária (EMBRAPA, 2018).

De acordo com EMBRAPA (2011), o grupo dos Nitossolos são solos constituídos por material mineral, não hidromórfico, caracterizado pela presença de horizonte diagnóstico subsuperficial B nítico⁵⁷ em sequência a qualquer tipo de horizonte A. São solos minerais homogêneos, argilosos, com estrutura que favorece a retenção de água, mas que mantêm boa drenagem, propriedades físicas extremamente desejáveis em condições de sazonalidade climática e estação seca prolongada.

A composição mineralógica dos Nitossolos está associada diretamente ao material de origem e originados de rochas básicas como basalto e diabásio da formação Mosquito. São profundos, bem drenados, de coloração variando de vermelha a brunada⁵⁸. Em geral, são

56 Os latossolos são muito intemperizados, com pequena reserva de nutrientes para as plantas, representados normalmente por baixa a média capacidade de troca de cátions. Mais de 95% dos latossolos são distróficos e ácidos, com pH entre 4,0 e 5,5 e teores de fósforo disponível extremamente baixos, quase sempre inferiores a 1 mg/dm³. Em geral, são solos com grandes problemas de fertilidade.

57 De acordo com EMBRAPA (2011), o horizonte B nítico é um horizonte subsuperficial com moderado ou forte desenvolvimento estrutural do tipo prismas ou blocos, com a superfície dos agregados reluzentes, relacionadas a cerosidade ou superfícies de compressão.

58 De acordo com SiBCS (2019), o horizonte diagnóstico B nítico é caracterizado pelo desenvolvimento de estrutura e de cerosidade, mas apresenta relação textural (B/A) menor que 1,5, o que exclui solos com incremento

moderadamente ácidos a ácidos, apresentando saturação por base alta ou baixa, com composição caulínico-oxídica implicando na presença de argila de atividade baixa, identificados em diversos ambientes climáticos, estando normalmente associados às áreas de relevos de suave ondulado a forte ondulado (EMBRAPA, 2019).

Os Argissolos são caracterizados pela presença de horizonte diagnóstico B textural, apresentando acúmulo de argila em profundidade devido à mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo. Observa-se a presença de manchas de Argissolos em terrenos ondulados, de altitude variando entre 210 e 300 metros, no norte e sul da área. Os Vertissolos⁵⁹ ocorreram em ambientes de topografia ondulada a forte ondulada a forte ondulada, de altitude entre 230 e 430, normalmente associados a ambientes de bacias sedimentares ou a partir de sedimentos com predomínio de materiais de textura fina e com altos teores de cálcio e magnésio, ou ainda, diretamente de rochas básicas ricas em cálcio e magnésio.

A composição geomorfológica em associação com as características litológicas e climáticas proporcionam à área elevado potencial hidrográfico formado por um conjunto de rios navegáveis e outros rios de menor potencial hidrográfico. Destacam-se a nível nacional as bacias hidrográficas dos rios Parnaíba (que drena mais de 60% da área) e a bacia do rio Tocantins (que drena aproximadamente 40% da área), essas duas bacias hidrográficas drenam um conjunto de subbacias hidrográficas na qual destacam-se a bacia do rio Balsas, possui área total de 25.481,42 km² e perímetro de 3.055,95 km, sendo o Rio das Balsas o curso principal com 533,48 km de extensão com área de drenagem em nove municípios desaguardo no rio Parnaíba.

Outra importante área de drenagem é a bacia hidrográfica do rio Farinha, um corpo d'água que drena uma área de 5.255 km² abrangendo o limite territorial de cinco municípios, incluindo parte do Parque Nacional das Chapadas das Mesas, com exutório no rio Tocantins. Destacam-se também outras bacias de drenagem como a bacia hidrográfica do rio Itapicuru, Bacia do rio Água Boa, bacia do rio Lajeado, que drenam para o rio Tocantins, e as bacias dos rios Medonho, Balsinhas, Cocal que drenam em direção ao rio Parnaíba.

A dinâmica natural da área, principalmente a ocorrência de Neossolos Litólicos, rochas de maior durabilidade e diferença topográfica proporciona a formação de uma série de cachoeiras, riachos, veredas, toda riqueza em águas superficiais, e têm um importantíssimo valor para a manutenção da

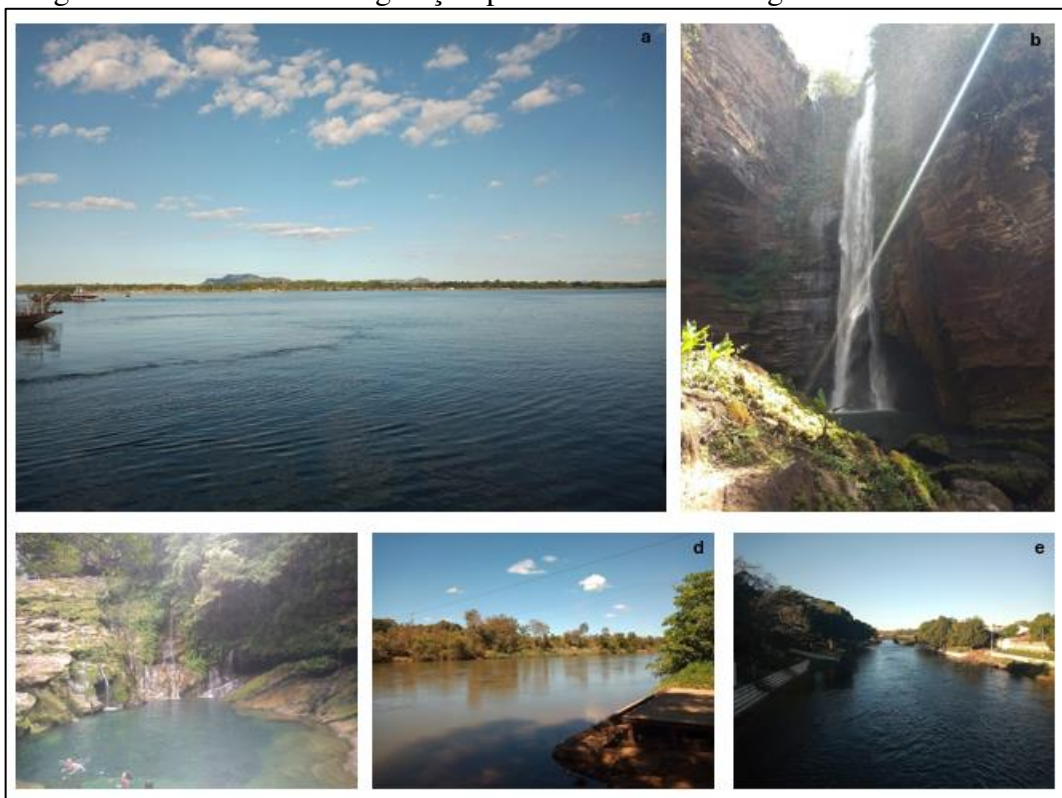
no teor de argila requerido para a maior parte do horizonte B textural. Apresentam textura argilosa ou muito argilosa (teores de argila maiores que 350g/kg de solo). Os Nitossolos podem apresentar alta (eutróficos) ou baixa (distróficos) fertilidade natural, acidez ligeiramente elevada e teores variáveis de alumínio. Em áreas mais planas, os Nitossolos, principalmente os de maior fertilidade natural e de maior profundidade, apresentam alto potencial para o uso agrícola. Já em ambientes de relevos mais declivosos, apresentam alguma limitação para uso agrícola relacionada à restrição a mecanização e à susceptibilidade à erosão.

59 Normalmente são pouco profundos a profundos, embora ocorram também solos rasos. Variam de imperfeitamente a mal drenados.

biodiversidade, ademais do alto potencial para o turismo, uma importante atividade econômica, principalmente para os municípios de Riachão e Carolina, que contempla a rota turística para a área .

A figura 36 ilustra alguns dos principais canais de drenagem que caracterizam a dinâmica hidrográfica da Mesorregião Sul Maranhense.

Figura 36 – Padrões de vegetação presentes na mesorregião Sul Maranhense



(a)-vista parcial do Rio Tocantins Carolina-MA (18 fev. 2023); (b) Cachoeira de Santa Barbara Carolina (MA) (20 fev. 2023); (c) – Poço Azul, Carolina (MA) (20 fev. 2023); (d) Travessia de balsa no rio Parnaíba em Tasso Fragoso (MA) (22 fev. 2023); (e)-vista parcial do rio Balsas em Balsas (MA) (23 fev. 2023)

Fonte: dados de pesquisa (2021)

A interação entre as condições litológicas, topográficas, climáticas e pedológicas condiciona a formação de um conjunto de formações vegetacionais (figura 37) caracterizada por árvores de troncos e caules tortuosos, folhas grandes e adaptadas à sazonalidade climática e às tipologias de solos, que em grande parte da área são pobres e profundos, tipicamente arenosos e com alta concentração de alumínio, a vegetação natural da área, assim como em grande parte do cerrado, apresenta elevada adaptação a dinâmica natural de fogo que a região está sujeita, (Alencar *et al.*, s.d).

Figura 37 – Padrões de vegetação presentes na mesorregião Sul Maranhense



(a)-vista parcial de formações savânicas em Carolina-MA (18 fev. 2023); (b) – Formações Campestres em Riachão-MA (20 fev. 2023); (c)- Formações Savânicas em Tasso Fragoso-MA (18 fev. 2023); (d) formações campestres em Alto Parnaíba-MA (21 fev. 2023); (e)- formações campestres e florestais em Balsas-MA (23 fev. 2023)

Fonte: dados de pesquisa (2021)

Desse modo, a vegetação natural da mesorregião Sul Maranhense pode ser agrupada em três fitofisionomias tipicamente distintas: i) formações florestais, ii) formações savânicas e iii) formações campestres. estas agrupam um conjunto menor de fitofisionomias que caracterizam a paisagem, nas que respectivamente apresentam as características de cada uma das fitofisionomias e alguns padrões fitofisionômicos encontrados na microrregião de Porto Franco, onde se pode identificar as formações Savânica (a e c), Florestais (e) e Campestres (b e d).

Segundo dados da Embrapa ([s.r]), as formações florestais⁶⁰ englobam um conjunto de tipologias vegetais de espécies arbóreas de dossel contínuo, a exemplo da mata ciliar, mata de galeria, mata seca e cerradão. A mata ciliar e de galeria estão associadas à proximidade de cursos d'água, que podem ocorrer em terrenos bem drenados ou mal drenados. Já a mata seca e o cerradão ocorrem nos interflúvios em terrenos bem drenados, não estando associados à ocorrência de cursos de água.

⁶⁰ A Mata de Galeria possui dois subtipos: não-Inundável e Inundável. A Mata Seca três: Sempre-Verde, Semidecídua e Decídua. O Cerradão pode ser classificado como Mesotrófico ou Distrófico.

De acordo com Ribeiro e Walter (2008), as formações savânicas⁶¹ englobam quatro classes fitofisionômicas: o Cerrado sentido restrito, o Parque de Cerrado, o Palmeiral e a Vereda. O Cerrado sentido restrito caracteriza-se pela presença dos estratos arbóreo e arbustivo-herbáceo definidos, com as árvores distribuídas aleatoriamente sobre o terreno em diferentes densidades, sem que se forme um dossel contínuo.

O Parque de Cerrado, por sua vez, é caracterizado pela ocorrência concentrada de árvores em locais específicos do terreno. No Palmeiral, que pode ocorrer tanto em áreas bem drenadas quanto em áreas mal drenadas, há a presença marcante de determinada espécie de palmeira arbórea, e as árvores de outras espécies (dicotiledôneas) não têm destaque. Já a Vereda também se caracteriza pela presença de uma única espécie de palmeira, o buriti, mas esta ocorre em menor densidade que em um Palmeiral. Além disso, a Vereda é circundada por um estrato arbustivo-herbáceo característico.

Já as formações campestres englobam três fitofisionomias: o campo sujo, o campo limpo e campo rupestre. De acordo com Ribeiro e Walter (2008, p. 183), o Campo Sujo caracteriza-se pela presença evidente de arbustos e subarbustos entremeados no estrato arbustivo-herbáceo. No Campo Limpo a presença de arbustos e subarbustos é insignificante. Já o Campo Rupestre possui trechos com estrutura similar ao Campo Sujo ou ao Campo Limpo, diferenciando-se tanto pelo substrato, composto por afloramentos de rocha, quanto pela composição florística, que inclui muitos endemismos.

Como já citado, a vegetação apresentou acelerado processo de mudança da cobertura da terra, fator diretamente associado a programas de expansão da agricultura brasileira, iniciados ainda na década de 1970, com amplo apoio do Estado que, em associação com financiamento japonês, criou condições de ampliar a área de expansão de fronteira agrícola brasileira, provocando perda significativa da cobertura vegetal (Rocha, 2014).

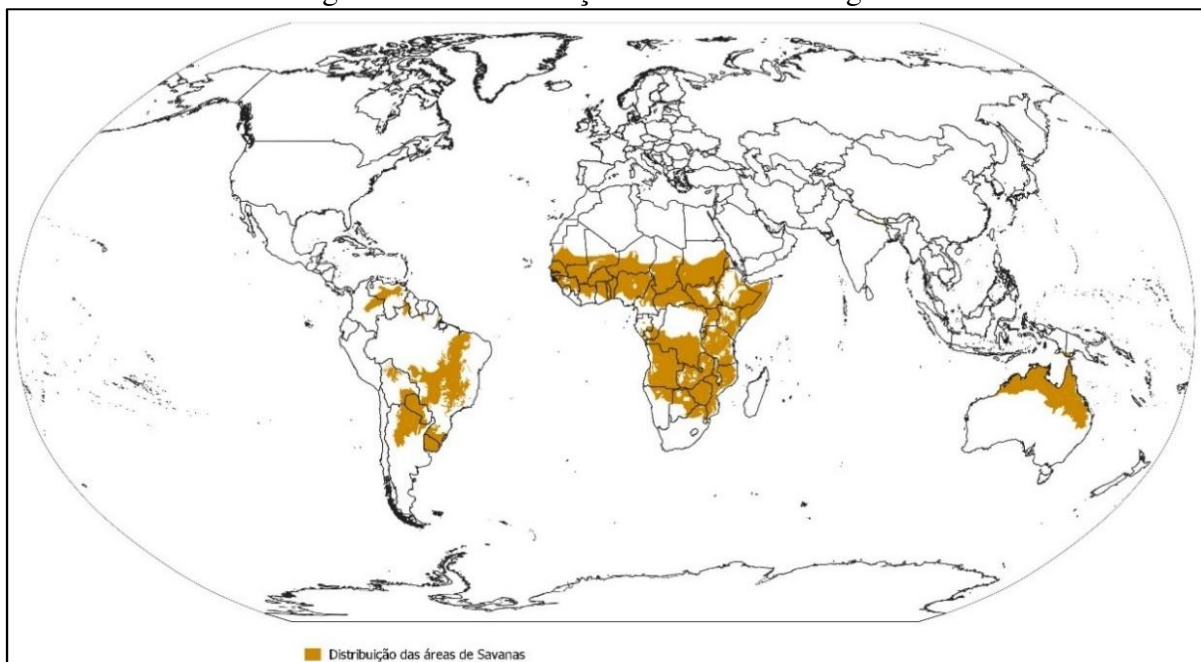
⁶¹ Ainda segundo Ribeiro e Walter (2006, p. 174), pela densidade (estrutura) arbóreo-arbustiva ou pelo ambiente em que se encontra, o Cerrado sentido restrito apresenta quatro subtipos: Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre. O Palmeiral também possui quatro subtipos principais, determinados pela espécie dominante: Babaçual, Buritizal, Guerobal e Macaubal.

4 FORMAÇÃO TERRITORIAL E EXPANSÃO AGRÍCOLA NOS CERRADOS MARANHENSES

4.1 Cerrado: características ambientais e dinâmicas territoriais

Ao determinar as ecorregiões⁶² do globo, Olson *et al.* (2001 apud WWF, 2012⁶³) definiram um total de 829 ecorregiões, agrupadas em 16 biomas. E, desse total, cerca de 51 ecorregiões correspondem a características de savanas (WWF, 2012). Cobrindo aproximadamente um quarto da superfície do Terra (figura 38) e considerado o quarto maior bioma do globo, as Savanas apresentam uma área em torno de 2.023.528.400 de hectares sendo encontradas na América do Sul (Cerrado e Lhano), África (Savanas africanas e Miombos), porção norte da Austrália (Savanas), além de enclaves na porção central da Ásia (Savanas Dipterocarp) (Goedert; Wagner; Barcelos, 2008; Ribeiro, Walter, 2008).

Figura 38 – Distribuição das Savanas no globo



Fonte: Adaptado de WWF (2012)

Com ocorrência em maior proporção nas regiões tropicais (entre os trópicos de câncer e capricórnio)⁶⁴ as Savanas⁶⁵ são consideradas domínios fitogeográficos caracterizados pela

⁶²https://portal-espacial.sibbr.gov.br/ws/layers/view/more/ecorregiao_terrestre_4326_iso88591

⁶³ <https://www.worldwildlife.org/publications/terrestrial-ecoregions-of-the-world>

⁶⁴ Conforme Solbrig (1991), as Savanas representam 20% de toda a cobertura terrestre do globo, sendo a África coberta por 65% desse bioma, a Austrália 60%, a América do Sul 45%, o sudeste asiático e Índia 10%.

⁶⁵ Walter, Carvalho e Ribeiro (2008) apresentam duas escolas de pensamento para a definição de savana. A primeira, europeia, baseada nas ideias de Collisson (1988) que conceitua savanas como uma “formação tropical com domínios de gramíneas, com maior ou menor proporção de vegetação lenhosa aberta e árvores de maior porte”. A

presença de uma camada contínua de vegetação herbácea (área de contato entre as zonas florestadas e campestres), mescladas por um dossel descontínuo de árvores de médio e alto porte, tendo sua fitofisionomia associada ao padrão desigual de distribuição das chuvas, tipologia de solos, em geral, pobres e proximidade do lençol freático, que dão a esses sistemas ambientais elevada biodiversidade e significativa fragilidade (Goedert; Wagner; Barcelos, 2008).

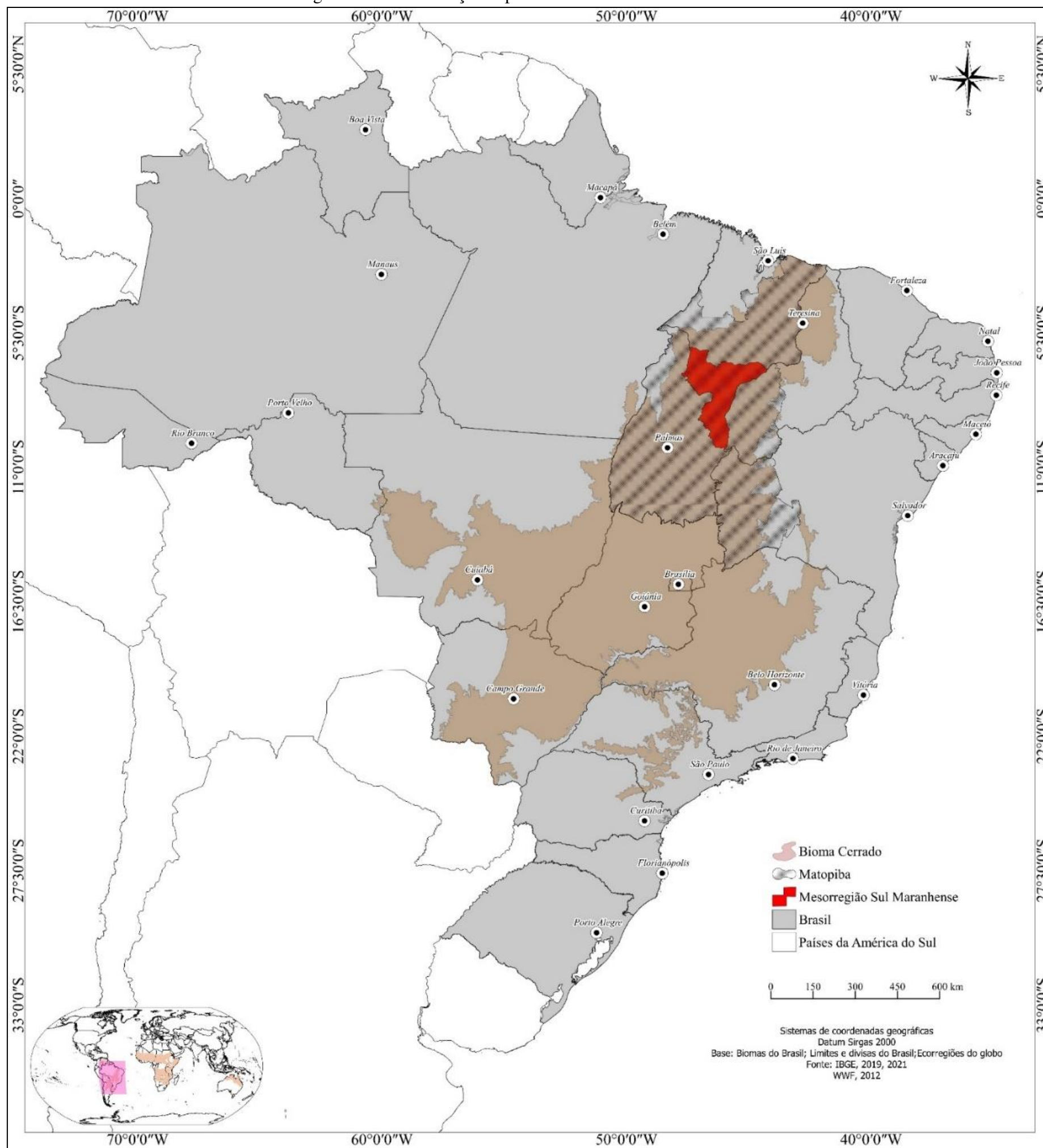
O segundo maior bioma do Brasil⁶⁶, conforme dados do IBGE (2019), abrangendo os limites territoriais de 10 estados⁶⁷ (Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins, além do Distrito Federal) (figura 39)⁶⁸ cobrem cerca de 23,93% do território nacional -aproximadamente 200 milhões de hectares-, o Cerrado corresponde a um complexo vegetacional com relações ecológicas e fitofisionômicas com outras savanas da América tropical, África e Ásia, e difere-se dessas por não ter relações ecológicas estreitamente associadas à dinâmica das chuvas, mas, sim, de fatores edáficos – fertilidade do solo, teor de alumínio saturação –, dinâmica de queimadas e corte, que produzem uma variedade de fitofisionomias, sendo considerada a savana mais biodiversa do globo (EMBRAPA [s.d]; Myers *et al.*, 2000; WWF, 2012; IBGE, 2019).

segunda, a escola Americana na qual destacam os estudos de Solbrig (1991) que, apesar de ter definição de savana semelhante ao de Colisson, expande o conceito para além das formações tropicais, adentrando também áreas do subtropicais, integrando estepes e pradarias como áreas de savanas.

⁶⁶ Conforme EMBRAPA [s.d], a área territorial do Cerrado é superada somente pela floresta amazônica. Destaca-se que o Cerrado é um complexo vegetacional que possui relações ecológicas e fitofisionômicas com outras savanas da América tropical e do continente africano e sudeste da Ásia e Austrália, sendo também influenciado por outros biomas, como a Amazonia, a Caatinga e a Mata Atlântica.

⁶⁷ Ao longo do tempo, os limites dos cerrados passaram por significativas alterações. O primeiro limite foi proposto ainda na década de 1980, com nível de escala superior a 1:5.000.000; baseado nos resultados do RadamBrasil. Em 2004 o IBGE lançou um limite dos biomas brasileiros na escala de 1:5.000.000. Já em 2019, o IBGE atualizou os limites, gerando uma nova delimitação para as áreas de cerrados, deixando de fora as áreas com características de cerrado ao norte dos estados do Amapá, Pará e Roraima.

⁶⁸ Conforme análise do novo limite do Cerrado disponível pelo IBGE (2019), o Cerrado engloba um total de 1.434 municípios, dos quais 1.041 têm mais de 50% de sua área territorial pertencente a esse bioma (Pereira *et al.*, 2022).

Figura 39 – Distribuição espacial do Cerrado brasileiro⁶⁹

Fonte: Adaptado de IBGE (2019)

⁶⁹ Ecorregiões Terrestres do Mundo é uma regionalização biogeográfica da biodiversidade terrestre da Terra. As nossas unidades biogeográficas são ecorregiões, que são definidas como unidades relativamente grandes de terra ou água, contendo um conjunto distinto de comunidades naturais que partilham uma grande maioria de espécies, dinâmicas e condições ambientais. Existem 867 ecorregiões terrestres, classificadas em 14 biomas diferentes, como florestas, pastagens ou desertos. As ecorregiões representam a distribuição original de conjuntos distintos de espécies e comunidades (Olson *et al.*, 2001).

Considerado um dos principais ecossistemas tropicais da Terra, representando aproximadamente 10% de todas as áreas de savanas do globo⁷⁰, o Cerrado⁷¹ caracteriza-se como um bioma heterogêneo⁷², formado por um conjunto diferenciado de microbiomas, que repousa sobre extensas superfícies de aplainamento, mescladas por um conjunto significativo de planaltos sedimentares com topografia tipicamente plana a suavemente ondulada de altitude entre 200 e 1.700 metros, onde se destacam os maciços e os planaltos da porção central do Brasil, intercalados por interflúvios e planícies associadas a antigos leitos de inundações dos rios presentes na área (Ab' Sáber, 2003).

Ressalta-se que possui significativa sazonalidade climática⁷³, com dois períodos bem definidos, um chuvoso (entre outubro e março) e um seco (de abril a setembro). No período de chuvas, as médias pluviométricas podem chegar a 1.800 mm e amplitude variando entre 750 e 2.000 mm, com quedas significativas no período de estiagem, quando os índices de precipitação registram valores abaixo dos 50 mm (podendo chegar a zero em algumas regiões do cerrado). Tal padrão reflete diretamente nos padrões de temperatura da área, com as máximas absolutas podendo chegar a 40°C e as mínimas inferiores a 18°C (Vallejo, [s.d]; Sano *et al.*, 2007; Sano *et al.*, 2020).

Os solos⁷⁴ da área, em geral, apresentam textura arenosa ou argilo-arenosa, significativamente lixiviados, profundos, bem drenados e bem formados, predominando os Latossolos que recobrem mais de 43% dos limites dos cerrados, os Neossolos – Litólicos e Quartizarenicos – que representam 22% da área e Plintossolos – 11% da área (IBGE, 2021). A sazonalidade climática em associação com condicionantes pedológicos e topográficos condicionam a composição de uma rica e biodiversa flora que podem ser diferenciadas em 11 (onze) tipos fitofisionômicos⁷⁵ agrupados em três grandes grupos fitosociológicos⁷⁶: (i) as formações florestais, (ii) as formações savânicas, (iii) formações campestres (Ribeiro; Walter, 2008; Brito, 2018) (figura 40).

⁷⁰ O Cerrado apresenta características que o diferencia de outras savanas do globo, conforme Rizzini (1979), pois, enquanto os cerrados são semidecíduos (não perde totalmente a folhagem durante o período seco), as savanas africanas são caducifólias (perdem as folhas na estação seca). O autor destaca ainda as diferenças no padrão de estratificação, já que no Cerrado o estrato graminoso apresenta densidade e altura inferior às encontradas nas savanas africanas, característica também observada nos portes arbóreos e arbustivos.

⁷¹ O termo cerrado tem sua origem do latim *serare* que significa cerrar, fechar, encerrar, caracterizando a área como um ambiente de vegetação fechada ou densa. Na América do Sul, são representados pelos Cerrado brasileiro, os Llanos venezuelanos e colombianos do rio Orinoco, e os Llanos de Mojos da Bolívia (Vallejo, [s.d]).

⁷² Sano *et al.* (2022) apresenta uma divisão do Cerrado em 19 ecorregiões geográficas.

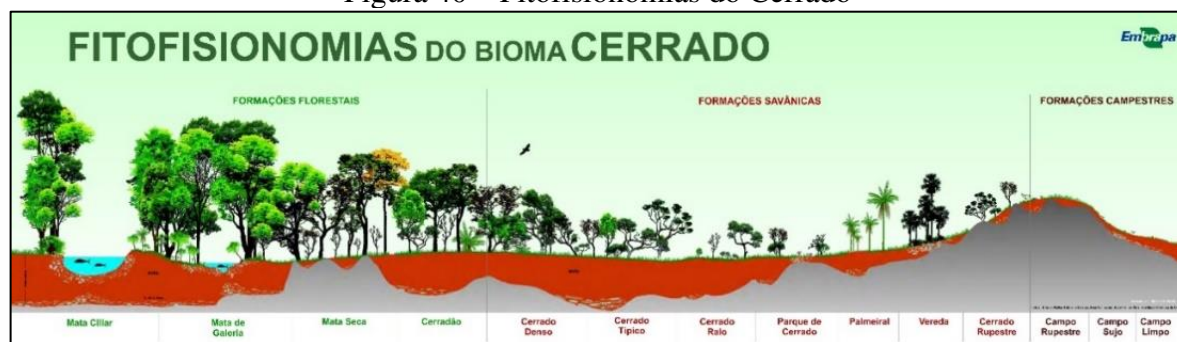
⁷³ Segundo Vallejo (s.d), o Cerrado ocupa uma região climática classificada como Aw por Koppen. Sendo uma área de clima do tipo tropical típico ou tropical chuvoso.

⁷⁴ Esses solos têm como características capacidade de retenção de água relativamente baixa, pequeno teor de matéria orgânica – geralmente entre 3 e 5% – e fertilidade natural baixa, ricos em alumínio, que explica o padrão tortuoso da vegetação (Reatto *et al.*, 2008; EMBRAPA, [s.d]).

⁷⁵ <https://www.embrapa.br/cerrados/colecao-entomologica/bioma-cerrado>

⁷⁶ Conforme Sano *et al.* (2006), as florestais, com formação de dossel contínuo ou descontínuo e predomínio de espécies arbóreas; as savânicas, consideradas o cerrado propriamente dito, são caracterizadas pela presença de áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato graminoso, sem a formação de dossel contínuo; já as formações campestres englobam áreas com predomínio de espécies herbáceas e algumas arbustivas, mas sem a presença de árvores na paisagem.

Figura 40 – Fitofisionomias do Cerrado



Fonte: Embrapa [s.d]

Esse bioma é considerado estratégico do ponto de vista ecológico, econômico e cultural, principalmente por suas características ambientais, biodiversidade, recursos hídricos e serviços ecossistêmicos (Scaramuzza *et al*, 2017). Caracteriza-se por apresentar uma rica e biodiversa biota, com catalogação de mais de 12 mil espécies, das quais, aproximadamente, 40% são endêmicas, sendo responsável por cerca de 5% de toda a biodiversidade global (Myers *et al.*, 2000; 2010; MMA, 2013; WWF, 2018; Conservação Internacional, 2020).

Outra importante característica do bioma é a sua elevada capacidade de regulação hídrica – o Cerrado recebe o título de “caixa d’água” do Brasil –, principalmente por possuir uma grande disponibilidade de águas subterrâneas, e sobre seus domínios encontram-se também as nascentes de oito grandes sistemas hidrográficos nacionais, como as bacias hidrográficas dos rios Paraná, Araguaia/Tocantins, São Francisco, Parnaíba, Gurupi, Jequitinhonha e Xingu. (MMA, 2014).

Apesar de toda a importância, o Cerrado possui apenas 13,29% de sua área protegida por unidades de conservação (UCs) federais, estaduais e municipais, Terras Indígenas e Área Quilombolas⁷⁷, dos quais, aproximadamente, apenas 5,7% é protegido integralmente por unidades de conservação de proteção integral (tabela 7) (Funai, 2013; MMA, 2015; Incra, 2017), fator decisivo para a acelerada taxa de transformação espacial que o bioma tem apresentado nos últimos 40 anos (Myers *et al.*, 2000; WWF, 2018; Sano *et al.*, 2022).

⁷⁷Conforme dados disponíveis, no Cerrado encontram-se 268 Unidades de Conservação, 72 Áreas Quilombolas e 112 Terras Indígenas que, somadas, correspondem a uma área de aproximadamente 26 Mha de hectares (13% de todo o cerrado).

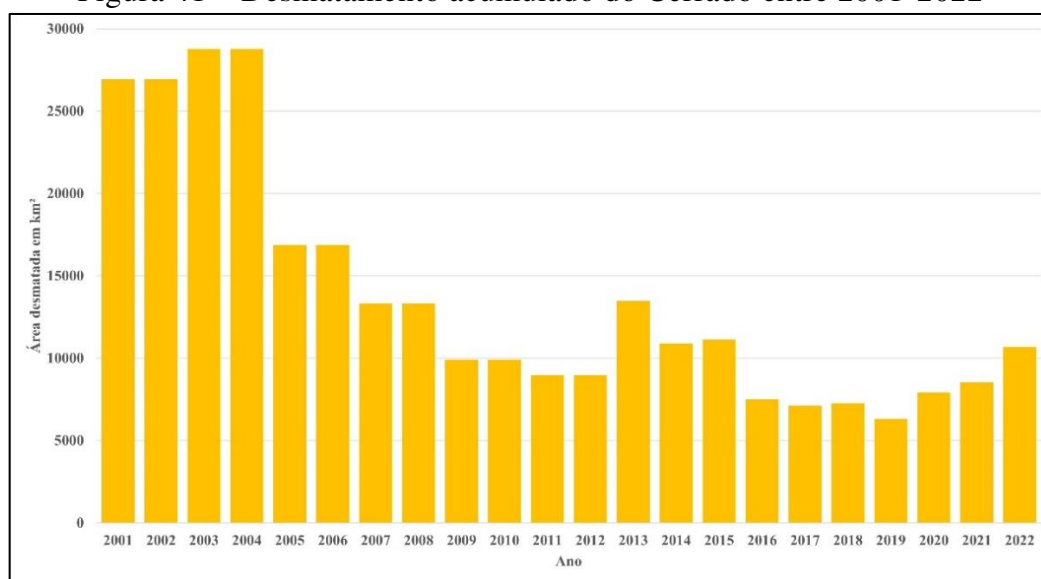
Tabela 7 - Taxa de proteção do Bioma Cerrado

Tipo	Área (ha.)	Taxa de Proteção
Unidades de conservação	16.870.323	8,50%
Proteção Integral	11.432.291	5,76%
Uso Sustentável	5.438.032	2,74%
Área Quilombolas	501.309,45	0,25%
Terras Indígenas	9.003.784,2	4,54%

Fonte: Adaptado de MMA (2015), Incra (2017) e Funai (2013)

A despeito de toda importância para a conservação da biodiversidade, serviços ecossistêmicos e capacidade de regulação e disponibilidade hídrica (MMA, 2015), o bioma tem concentrado acentuadas taxas de perda da cobertura vegetal natural⁷⁸ (figura 41), consequência do rápido avanço da fronteira agrícola moderna para a porção central do país, que colocou o Cerrado na lista de hotspots⁷⁹ de biodiversidade de conservação global (Silva, 2013; Rocha, 2014; Brito, 2018).

Figura 41 – Desmatamento acumulado do Cerrado entre 2001-2022



Fonte: INPE, 2023

De acordo com MMA (2014), o Cerrado apresentou acelerado processo de mudança da cobertura da terra, intensificado a partir da década de 1970, principalmente pela implementação de políticas públicas de cunho estatal que, em associação com capital estrangeiro, criou condições de ampliar a área de expansão de fronteira agrícola brasileira e promoveu uma intensa exploração do Cerrado (Delgado, 2005; Matos, 2006; INPE, 2021; INPE [s.d.]). Esse

⁷⁸ Fatores como a baixa taxa de proteção por instrumentos legais, que em associação com a expansão da fronteira agrícola, são considerados decisivos para a elevada taxa de conversão da vegetação natural que o Cerrado tem apresentado nas últimas décadas.

⁷⁹ Termo criado pelo cientista Norman Mayers, Hotspots de biodiversidades são áreas consideradas extremamente ricas em biodiversidade e alto grau de endemismo.

cenário ocasionou significativas transformações no bioma, com taxas de perda de cobertura vegetal.

Mapeamentos realizados por Sano *et al.* (2009) mostram que até 2008 aproximadamente 47% desse bioma tinham sido convertidos para outras classes, principalmente de pastagens e agricultura. Bolfe *et al.* (2016) destacam que entre 2000 e 2010 cerca de 7.000 km² de Cerrado foi transformado em outros tipos de uso, principalmente novas áreas agrícolas, sendo maior taxa de conversão as pastagens naturais (campos) e florestas (savanas abertas e florestadas).

Dados do INPE (2021) mostram que, entre os anos de 2015 e 2020, o Cerrado apresentou área desmatada em torno de 45.732,78 km². Os estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia apresentam as maiores taxas de desmatamento no período analisado. Como já mencionado, tais estados encontram-se incluídos em uma região caracterizada como principal fronteira de expansão agrícola, atualmente denominada de MATOPIBA, e têm concentrado a maior parte do desmatamento registrado no Cerrado, tendo o cultivo de culturas destinado à produção de biocombustível, como a cana-de-açúcar, a ameaça mais recente à manutenção dos remanescentes florestais de Cerrado (Brito, 2016; Polizel *et al.*, 2021),

Considerado a última fronteira agrícola do país (Bolfe, 2016), o cerrado tem papel ímpar na agropecuária brasileira, setor responsável por 25% do produto interno bruto (PIB) nacional, e representam as principais áreas de produção de *commodities* agrícolas, carnes e biocombustíveis, nas quais o Brasil exerce liderança mundial.

A dinâmica produtiva do cerrado tem estreita ligação com o Estado, associado ao capital privado, desempenhando papel significativo no processo de expansão sobre as áreas nativas da vegetação, principal fator de transformação de uso e cobertura da terra nos últimos anos (Sano *et al.*, 2010).

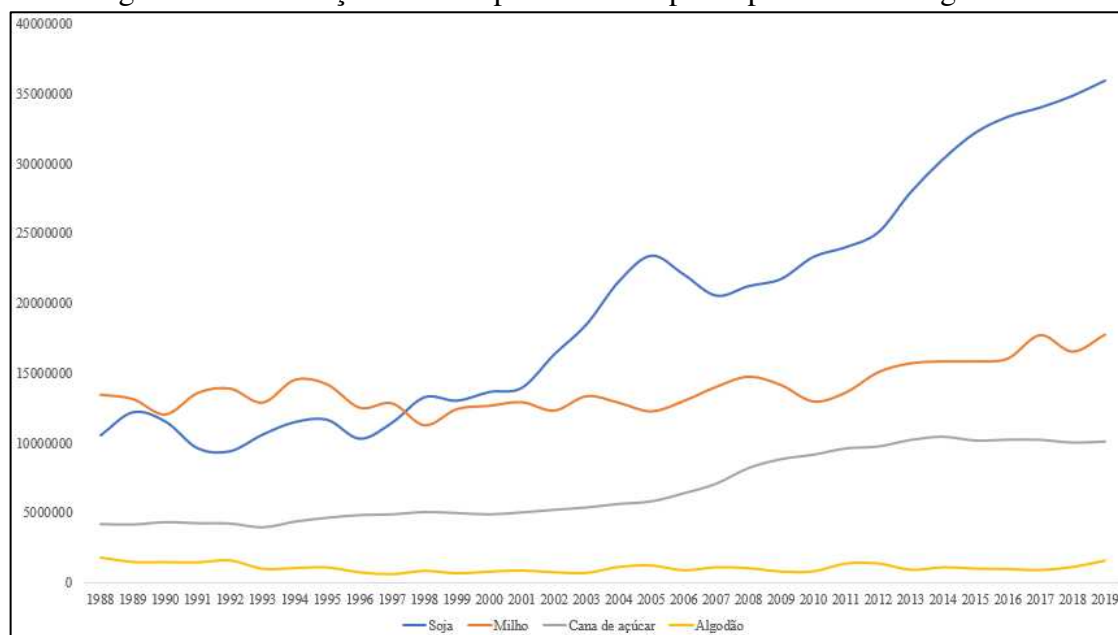
O processo de expansão da agricultura nessa área não é recente, iniciando-se ainda na década de 50 com a criação do plano piloto de Brasília e a mudança da capital para a porção central do país, cujo objetivo era impulsionar o processo de ocupação dos cerrados. Porém é esse processo tem estreita relação com a atuação do Estado, que em associação com cooperação e financiamento para o desenvolvimento a produção, que resultou em uma mudança no modelo produtivo e resultou em intensas substituição da cobertura de cerrado.

4.2 A expansão agrícola no Cerrado

O Brasil se destaca no cenário mundial como grande produtor de commodities agrícolas. E fatores como o aumento da demanda internacional, investimentos em tecnologia e atuação do Estado em associação com a iniciativa privada, possibilitaram ao Brasil a liderança mundial na produção e exportação, principalmente da soja. O setor agropecuário tem um papel ímpar na balança comercial brasileira, responsável por aproximadamente 26,6% do PIB, totalizando quase R\$ 2 trilhões, com a agricultura responsável por 68% desse total e a pecuária por 32% (CEPEA; CNA, 2021), com predomínio da soja, além do cultivo de milho, cana-de-açúcar e milheto, com 26% da produção nas áreas de cerrado (IBGE, 2023).

Dados da produção agrícola municipal (IBGE, 2023) mostram que o cultivo da soja (figura 42) passou de 23 milhões de hectares em 2010 para 35 milhões de hectares em 2022, aumento de 52% de área. A quantidade produzida de grão passou de 58 milhões em 2009 para 114 milhões de toneladas em 2019. Já o complexo produtivo da soja registrou faturamento de US\$ 17,115 bilhões em vendas em 2010 contra US\$ 5,297 bilhões em 2021, responsável por aproximadamente 9% das exportações do país. Esses valores representam uma alta de 227% no período analisado e mostram o peso da produção agrícola dentro da balança comercial brasileira (WWF, 2020).

Figura 42 – Evolução da área plantada das principais culturas agrícolas



Fonte: adaptado de IBGE (2020)

Destaca-se que o processo de expansão da agricultura brasileira está associado ao investimento em tecnologias, que possibilitou a ocupação de áreas antes não exploradas,

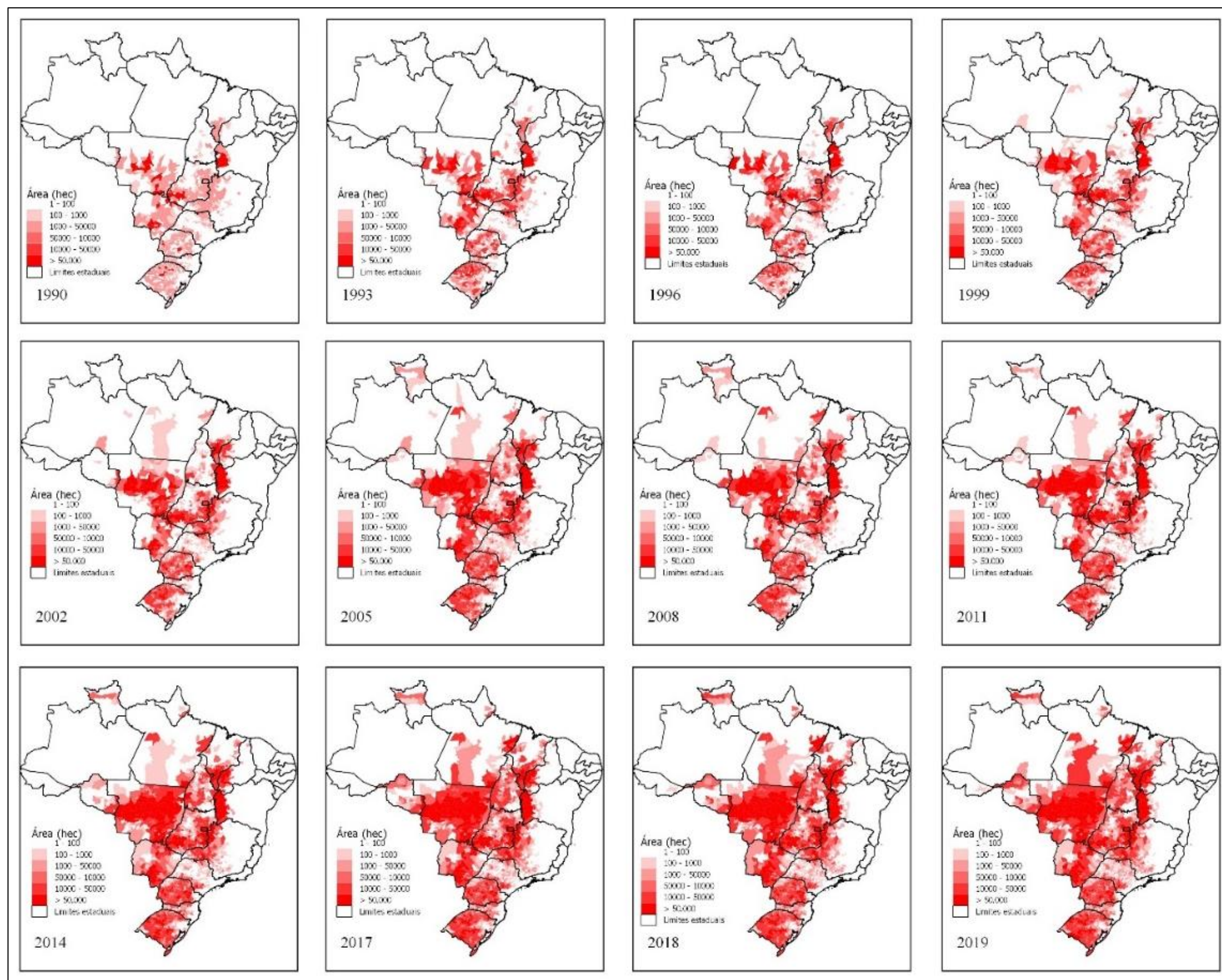
ampliando seu alcance à porção norte-nordeste do país como ocorreu no Cerrado, haja vista que a inserção da soja se iniciou predominantemente nos estados da região sul do país ainda na década de 1960, quando esse produto passou a ocupar áreas antes exploradas por outras lavouras, expandindo-se a partir de 1970. A partir de incentivos do Estado e do capital estrangeiro, expandiu-se para outros estados, com destaque para Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, alguns setores do oeste baiano, predominantemente áreas caracterizadas pelo Cerrado.

De acordo com Santos (2011) e Almeida (2017), a partir de 1970, os cerrados passaram a integrar os Programas de Desenvolvimento dos Cerrados-POLOCENTRO e o Programa Nipo-Brasileiro de Desenvolvimento Agrícola da Região dos Cerrados-PRODECER. Ambos pretendiam incentivar a agricultura no Cerrado, a partir da incorporação do padrão tecnológico da “Revolução Verde” já em voga desde 1950, buscando conseguir condições de competitividade internacional, tendo a soja como o principal atrativo, transformando o Cerrado em uma das principais áreas de produção nacional.

Apesar da produção de soja no Brasil ser considerada recente em comparação com outros países, com números ascendentes, dados da FAO (2022) mostram que no ano de 2012 o Brasil ocupava a terceira posição mundial em exportações, atrás dos Estados Unidos e da União Europeia. Em 2019 o país alcançou a liderança mundial de produção e exportação de soja com 114.269.392,00 toneladas, ultrapassando os Estados Unidos que registrou 96.793.180,00 toneladas nesse ano (FAO, 2020), sendo atualmente a cultura agrícola com maior área plantada do Brasil, considerando que 44% de toda área cultivada nacional é voltada para esse cultivo. Pontua-se que dos 35 milhões de hectares de soja 21 milhões de hectares estão localizadas no bioma Cerrado, que corresponde a 58% de toda a área destinada à soja.

A partir dos anos 1990 (figura 43), observou-se um avanço sobre as regiões nordeste e norte do país, com destaque para o norte do Tocantins e o sul do Maranhão, com a implementação da terceira etapa do PRODECER. Dos anos 2000 em diante, ocorre um deslocamento para o leste do Maranhão e sul do Piauí, com intensificação a partir de 2010, com expansão significativa da soja.

Figura 43 – Expansão da soja no Brasil entre 1990 e 2022



Fonte: Adaptado de IBGE (2020)

Em 2015 o processo de expansão da fronteira agrícola é institucionalizado com a criação do MATOPIBA, a partir do Decreto 8.447 de 06 de maio de 2015. De acordo com a EMBRAPA (2016), o MATOPIBA apresenta uma área formada por 31 microrregiões, 337 municípios, totalizando aproximadamente 74 milhões de hectares, localizada nos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia, que corresponde à chamada última fronteira agrícola do Cerrado.

Conforme Carneiro Filho e Costa (2016), 74% de toda a área de expansão agrícola identificada no Cerrado, entre 2000 e 2019, ocorreu em área já convertida em outras classes, principalmente pastagens, e em todo o bioma, ao menos, 33,4 milhões de hectares de áreas antropizadas teriam hoje condições de se converter em agricultura de grãos.

Os supracitados autores afirmam também que na área de abrangência do MATOPIBA observa-se expressivo aumento das áreas destinadas à agricultura sobre áreas de vegetação natural, fator associado principalmente à ausência de áreas antropizadas com aptidão para a agricultura. Dados de desmatamento do cerrado apontam que os estados integrantes do MATOPIBA apresentaram altas taxas de desmatamento, com acúmulo superior a 10% entre os anos de 2001 e 2020, com destaque para os estados que a partir de 2015 passaram a liderar os índices de desmatamento, Tocantins (23%) e Maranhão (19%). como mostrado na tabela 8

Tabela 8 - Desmatamento do cerrado acumulado por estado entre 2001 e 2022

UF	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
MA	2338.62	2344.5	2935.06	2893.01	2431.07	2391.72	2961.54	2948.96	1733.9	1721.1	1413.67	1446.17	1677.85	1878.4	1681.9	1259.9	1503.42	1545.53	1347.26	1871.51	2235.71	2780.65
TO	2929.09	2937.23	3128.07	3094.85	2641.08	2641.08	1829.65	1833.41	1849.64	1853.22	1749.32	1757.56	2880.87	2271.7	3081.6	1637.83	1727.83	1587	1539.43	1584.35	1711.24	2127.33
BA	1207.61	1207.61	1821.29	2036	1235.81	1235.81	1474.18	1474.18	891.01	891.01	1148.49	1282.09	1047.39	860.09	1080.8	648.99	658.7	598.16	714.91	769.28	923.64	1427.85
PI	866.37	866.37	1666.62	1658.36	1329.7	1344.83	863.6	863.6	1128.82	1128.82	911.54	902.07	1898.04	1292.9	778.72	983.41	566.53	750.6	425.6	897.98	612.75	1198.8
GO	6670.86	6646.08	6202.95	6223.22	2479.54	2495.56	1518.89	1519.68	1471.66	1483.41	989.76	993.32	1530.95	1197.8	1230.5	671.73	861.89	739.09	665.99	732.28	920.43	982.07
MG	5179.78	5198.68	4258.11	4132.02	2460.71	2484.04	1993.06	2004.85	1244.09	1245.14	1332.15	1272.94	1899.68	1827.7	1050.4	373.56	492.13	504.55	466.32	650.16	849.32	858.74
MT	4752.39	4752.39	5869.27	6057.14	2520.69	2505.56	1770.05	1770.05	980.26	980.26	924.99	949.79	1851.38	1042.9	1614.6	1254.62	1028.65	1042.46	883.7	751.94	774.32	732.47
MS	2713.77	2713.77	2299.71	2299.71	1509.78	1509.78	770.37	770.37	478.24	478.24	351.95	351.95	480.22	272.49	586.59	319.68	265.01	258.66	256.38	299.37	287.67	314.99
PA	131.14	123	111.27	116.89	115.32	115.32	77.2	73.44	55.8	52.22	0.82	0.82	169.6	190.44	0.87	293.2	2.04	198.09	4.24	312.6	192.19	243.65
RO	6.79	6.79	55.22	55.22	15.05	15.05	12.38	12.38	5.48	5.48	0.41	0.41	7.29	17.45	2.17	45.21	1.28	17.59	8.32	23.53	18.21	12.58
DF	12.78	12.78	82.43	82.43	27.48	27.48	10.61	10.61	12.39	12.39	6.52	6.52	11.16	20.37	5.36	2.56	5.62	8.18	2.66	4.78	4.57	5.56
SP	95.62	95.62	322.09	103.24	93.29	93.29	29.01	29.01	38.89	38.89	144.87	10.85	23.8	24.7	9.62	2.07	1.7	9.14	3.75	5.6	1.29	3.84
PR	28.31	28.31	14.65	14.65	19.31	19.31	3.19	3.19	20.01	20.01	1.74	1.74	3.36	7.53	5.93	4.34	2.54	0.76	0.44	1.69	0.07	0.18

Fonte: Inpe, 2023

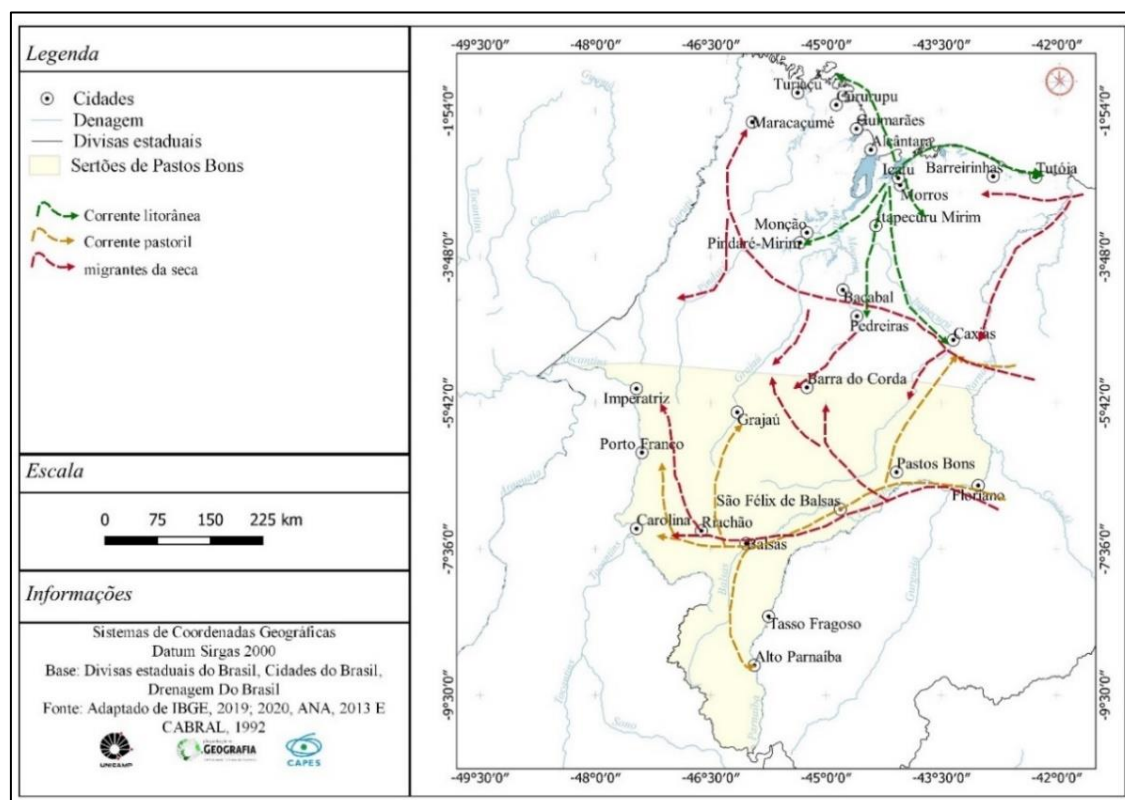
O estado do Maranhão apresentou crescimento significativo de áreas agrícolas, o processo de formação territorial, a dinâmica econômica que associado a programas de incentivo a expansão agrícola, como o PRODECER e o Corredor de exportação Norte-Sul, que dinamizaram o processo de mudança de uso e cobertura da terra, principalmente pela expansão da agricultura e pecuária.

4.3 O Sul Maranhense

4.3.1 A formação territorial do sul maranhense

O processo de colonização e a formação territorial da porção sul do Maranhão são resultantes do deslocamento da pecuária, que avançou em direção aos vales do médio e alto Parnaíba, denominada por Cabral (1992) de frente pastoril ou corrente dos criadores de gado⁸⁰ (figura 44).

Figura 44 – Correntes de ocupação do Maranhão e área correspondente ao chamado "Sertões de Pastos Bons"



Fonte: adaptado de Cabral (1992), Trovão (2008), Garcês Junior (2022)

⁸⁰ Segundo Cabral (1992), o processo de colonização e a formação territorial do Maranhão originaram-se a partir de duas frentes que possuem origem, dinâmica e tempos distintos. A primeira frente de ocupação do Maranhão é proveniente do litoral, que se expandiu sob o controle direto do Estado português. Teve como ponto de partida o litoral e avançou em direção ao interior ocupando os vales dos rios Itapecuru, Mearim, Pindaré e Munim, sendo a agroexportação, em especial do algodão, principal atividade econômica.

Iniciada em 1730 e responsável pelo processo de formação político-territorial da porção sul do Maranhão (Cabral, 1992; Rocha, 2015), a corrente de criadores de gado é caracterizada pelo deslocamento da pecuária, que migrou do interior do nordeste, principalmente Bahia e Pernambuco, onde a atividade canavieira já estava consolidada, para áreas mais afastadas das férteis terras próximas ao litoral, uma vez que “o capital, a mão-de-obra e a terra onde se produzia cana-de-açúcar e consequentemente o açúcar, não podia nem devia ser atrapalhada por outras atividades econômicas” (Trovão, 2008, p. 17), fator que ocasionou o deslocamento da pecuária, considerada antes uma atividade subsidiária ao engenho, em direção às terras devolutas do sertão (Cabral, 1992; Trovão, 2008; Rocha, 2015; Garcês Júnior, 2022).

Estabelecida um século após a consolidação da frente litorânea, a frente pastoril inicia-se com a dispersão do gado que partiu da Bahia acompanhando as margens do rio São Francisco e distribui-se em duas direções distintas: uma subindo o rio e alcançando os mercados consumidores de Minas Gerais e a segunda partindo em direção ao norte, chegando ao interior do Piauí e do Ceará, e, a partir do século XVIII, atravessou o rio Parnaíba e passou a ocupar os campos naturais do sertão maranhense, área que recebeu a denominação de sertões de Pastos Bons⁸¹ (Cabral, 1992; Fetosa; Trovão, 2006; Trovão, 2008; Santos, 2015).

Garcês Junior (2022) afirma que no Maranhão a frente pastoril teve direcionamento de leste a oeste, cuja sua principal característica era o seu caráter privado, pois, diferente da frente de ocupação litorânea, não contou com apoio da coroa portuguesa, tampouco da igreja católica, e, de início, ocupou os vales dos rios Gurgueia e Canindé (PI)⁸². A partir de 1740 penetrou as terras maranhenses e passou a ocupar os campos naturais inicialmente do vale do rio Parnaíba, onde foram instaladas as primeiras fazendas de gado, fato que resultou na criação do povoado de Pastos Bons em 1779.

Posteriormente a frente pastoril passou a deslocar-se para a porção central e sul do estado, até alcançar os vales dos rios Itapecuru⁸³, Mearim, Balsas, Manuel Alvez Grande, Farinha e Tocantins, e resultou na formação das cidades de São Felix de Balsas (fundada em

⁸¹ Cabral (1992) relata que as características naturais formam o chamariz. E, apesar de não ser considerado o determinante geográfico absoluto ou o principal condicionante para a expansão da pecuária na porção sul do Maranhão, a presença de campos naturais contínuos e cobertos de exuberantes pastagens, “Pastos realmente Bons”, regados por numerosos e perenes rios, córregos e ribeirões, protegidos por florestas ciliares e entremeados por capões de mato e palmeiras, com clima ameno e saudável, foi indispensável para o desenvolvimento da pecuária extensiva.

⁸² Conforme relata Velho (2009), ao mesmo tempo, haveria uma inflexão para leste, ocupando as orlas dos vales Úmidos do Maranhão e encontrar-se-ia na altura de Aldeias Altas (Caxias) uma tímida frente pecuarista vinda do litoral. Para sudeste, a frente baiana iria encontrar a pernambucana na altura do Ceará.

⁸³ Uma pequena parte da corrente pastoril, ao adentrar em terras maranhenses, curvou-se para o leste, a jusante do rio Itapecuru, e encontra-se em Aldeias Altas (atual Caxias), com a corrente que saiu do litoral (Feitosa; Trovão, 2006).

1835), Riachão (fundada em 1808), Carolina (1810⁸⁴), Grajaú (1811, antes denominada Porto da Chapada), Barra do Corda (1840), Porto Franco (1852⁸⁵), Santo Antônio de Balsas (atual cidade de Balsas em 1892) e outras cidades criadas após desmembramentos dos municípios citados (Cabral, 1992; Garcês Junior, 2022).

A corrente pastoril teve duração de 168 anos e, assim como a frente litorânea, não ocorreu de forma pacífica, sendo marcada por significativos confrontos entre indígenas, vaqueiros e fazendeiros, onde grande parte das comunidades indígenas que ocupavam os vastos vales foram dizimadas, ou migraram para partes mais distantes das áreas ocupadas por fazendas, cujo modo de criação se dava de maneira extensiva, o que ocasionou a necessidade de unidades territoriais com grandes extensões. Essa característica tornou o seu avanço da frente mais lento com o passar do tempo, principalmente com o desaparecimento gradativo das pastagens naturais, que barrou a expansão da frente pastoril em 1868 (Trovão, 2008; Santos, 2012; Rocha, 2015).

Ambas as frentes de povoamento, responsáveis pela formação da identidade maranhense, moldaram as formas de exploração econômica e os padrões de comportamento bastante distintos entre o norte e o sul do estado do Maranhão, resultando em inúmeras iniciativas de desmembramentos, principalmente da parte sul do estado, que por muito tempo passou por um intenso isolamento, situação que se observa até os dias atuais, a exemplo das iniciativas de criação do estado do Maranhão do Sul (Garcês Junior, 2022).

Trovão (2008) considera ainda uma terceira frente de ocupação do Maranhão, denominada de migrantes da seca, que também teve relativa participação no processo de formação territorial do sul maranhense. Oriunda do nordeste brasileiro, essa frente de ocupação acentua-se principalmente a partir de 1910, 42 anos após o fim da frente pastoril, e passou a ocupar áreas que até então não foram alcançadas pelas duas correntes de ocupação já mencionadas.

Trovão (2008) salienta que a corrente de migrantes da seca foi incentivada por fatores como condições climáticas no semiárido nordestino; dificuldade de absorção de mão de obra excedente no Nordeste; e a decadência da exploração da borracha na Amazônia. Assim como a frente de ocupação pastoril, apresentou direção de leste a oeste e avançou em

⁸⁴ Com objetivo de conquistar as terras da margem esquerda do Tocantins para o desenvolvimento da pecuária, fundou-se Carolina, inicialmente do lado do Goiás (atual Tocantins), porém em 1854, a Lei nº 1773, de 23 de agosto, definiu os limites entre as províncias do Goiás e Maranhão, e incorporou Carolina como parte do Maranhão (Feitosa; Trovão, 2006, p. 43).

⁸⁵ Conforme relatam Feitosa e Trovão (2006), nesse mesmo ano, é fundada por paraenses Santa Teresa de Imperatriz (atual Imperatriz), a jusante do rio Tocantins. Com a definição dos limites territoriais entre o Pará e o Maranhão, Imperatriz passou para jurisdição do Maranhão.

terras maranhenses por três frentes. A primeira atravessando o rio Parnaíba, via Teresina, alcançando Caxias e deslocando-se pelo interior do Maranhão, a cidades como Pedreiras e Bacabal até o vale do Turiaçu e a foz do Gurupi.

Uma segunda frente iniciada por Floriano (PI) ocupou a porção sul do Maranhão, chegando a Barão de Grajaú, São Raimundo das Mangabeiras, Balsas, Riachão, Carolina, alcançando Imperatriz e todos os outros municípios cuja dinâmica territorial já estava consolidada pela atividade da pecuária, e teve forte influência no desenvolvimento dessa atividade. E uma terceira frente chegou ao território maranhense via mar, envolvendo Tutoia, Araisos e Barreirinhas, onde dedicaram-se à agricultura de subsistência e à pesca (Garcês Junior, 2022).

Garcês Júnior (2022) considera que essa frente de ocupação foi importante para o reestabelecimento das atividades agrícolas em cidades onde a economia encontrava-se em crise, principalmente pelo declínio da economia algodoeira e outras atividades, a exemplo de Pedreiras e Bacabal. Trovão (2006) afirma que, graças ao imigrante nordestino, o Maranhão adquiriu características de um estado economicamente agrícola, fator observado até os dias atuais, e fundamental ao surgimento de várias cidades.

Além das frentes de ocupação responsáveis pela formação socio-territorial do Maranhão e, conseqüentemente, do sul maranhense, Garcês Junior (2022) destaca também o processo de migração dos chamados “gaúchos”, que tiveram atuação significativa no processo de expansão da ocupação da porção sul do Maranhão.

Conforme Garcês Junior (2022) apesar de não formar uma corrente de ocupação, nem uma frente de ocupação territorial, considerando que área já se encontrava territorialmente consolidada pela atividade pecuária resultante da frente pastoril, a chegada dos “gaúchos”, sobretudo a partir de 1970, resultou em uma reestruturação do espaço territorial do sul maranhense.

Dedicando-se à agricultura, principalmente rizicultura e posteriormente a sojicultura a partir de 1980, esse movimento modificou o espaço agrário, originando uma nova paisagem no sul do Maranhão, principalmente nos municípios de Balsas, Tasso Fragoso, Riachão e Fortaleza dos Nogueiras (Rocha, 2015).

Complementa-se a esse fato novas estratégias de ocupação territorial maranhense, dirigidas diretamente pelo Estado, a exemplo dos programas de expansão da agricultura, políticas de preços e créditos subsidiados, que Ferreira (2008a) considera “políticas territoriais contemporâneas” e que representou novas estratégias de desenvolvimento da economia maranhense, principalmente as monoculturas da soja, cana, algodão, com polo na porção sul do Maranhão, principalmente Balsas.

4.3.2 A expansão agrícola e as transformações do espaço agrário do sul do Maranhão

O Maranhão apresentou significativa expansão agrícola, sobretudo a partir de 1990, quando passou a integrar o que pode ser denominado de “*programas e políticas de expansão e modernização da agricultura brasileira*”. No estado, principalmente na porção sul, esse processo resultou em mudança no modelo de produção da agricultura, saindo de um modelo tradicional, com baixo nível técnico e tecnológico, e voltado, em geral, ao mercado interno, para uma agricultura mecanizada e caracterizada por um elevado nível tecnológico, na qual a soja tem sido o principal commodity produzido.

Conforme Sodré (2017), em menos de 30 anos a soja tornou-se o principal produto agrícola maranhense, estando presente em 12 das 21 microrregiões e em 58 dos 217 municípios (IBGE, 2022). As condições de demanda, investimentos em pesquisas, ampliação do crédito rural, investimentos em infraestrutura são alguns dos fatores que tornaram o sul maranhense o “celeiro produtivo” estadual. Soma-se a isso a atuação do Estado que, em associação com a iniciativa privada, foi fundamental para a ampliação e a consolidação do sul maranhense no circuito produtivo global de commodities agrícolas.

Almeida (2017) enfatiza que não se pode falar do processo de implantação da soja no território maranhense sem relacionar às estratégias do Estado, a partir da ampliação e construção de infraestruturas (portos, rodovias, ferrovias), subsídios financeiros e pesquisa, que formaram as bases para a atual estrutura produtiva.

Esse processo resultou em intensas transformações no espaço agrário maranhense, principalmente pela mudança nos padrões de produção, antes pautada no arroz, no milho, na mandioca e no extrativismo, principalmente do babaçu, para a monocultura da soja como principal produto agropecuário do estado (Alves, 2006; Ferreira, 2008b; Cunha, 2015).

Atualmente, a agropecuária   responsável por 30% de todo o produto interno bruto estadual, e vem aumentando sua participação de forma expressiva (IMESC, [s.d]). Esse processo resultou em significativas transformações espaciais, reflexo das mudanças dos padrões socioeconômicos e territoriais, observadas desde a década de 1970 e intensificadas a partir da década de 1990, no chamado “*boom da soja*”, quando sua produção passou de inexpressivo (3%) para um dos principais produtos cultivados no Maranhão, como abordado por Ferreira (2008a); Ferreira (2008b); Santos (2012); Mandujano (2013), Cunha (2015), Almeida (2017).

Conforme mencionado, até a década de 1960 as principais atividades econômicas de grande parte dos municípios que compõem a mesorregião Sul Maranhense eram a pecuária, o extrativismo – especialmente do babaçu – e a rizicultura. Esse perfil mudou a partir de 1970 quando o Estado passou a formular uma série de programas voltados à

modernização e à expansão da agricultura, com objetivo de inserir o Maranhão no circuito produtivo nacional⁸⁶, sendo Balsas o polo produtivo do estado.

No Maranhão os primeiros estudos para a implantação da soja no foram iniciados ainda na década de 1970, com forte atuação da Empresa Maranhense de Pesquisa Agropecuária-EMAPA⁸⁷; da SAGRIMA e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA⁸⁸, que desenvolveram pesquisas com objetivo de verificar a adaptabilidade e potenciais áreas para a inserção da soja no estado (Ferreira, 2008b).

A EMAPA foi criada em 1976 e em 1978 iniciou um programa de pesquisa sob a coordenação do Centro Nacional de Pesquisa de Soja-CNPSo, e tinha como prioridade a seleção de fenologias de soja adaptadas às condições edafoclimáticas do estado do Maranhão, a partir de polos experimentais, onde foram selecionados os municípios de Balsas (Cerrado), Bacabal (Cocais) e Brejo (Cerrado). Esses estudos buscaram identificar espécies resistentes a doenças e pragas comuns, melhores práticas de plantio e semeadura, níveis de correção do solo com calcário e fósforo, adubação com macro e microelementos, entomologia e microbiologia e tinham como objetivo de fortalecer a agricultura do Maranhão (Almeida, 2017).

A principal justificativa para o desenvolvimento e a inserção da cultura da soja no estado era de modificar o cenário econômico⁸⁹ que se encontrava em estagnação (Ferreira, 2008a; Almeida, 2017) e teve como resultado a criação de dois grupos de áreas para a expansão da soja, o denominado Grupo I, que abrangeu áreas do sul e sudeste do Maranhão, nas quais incluíam as microrregiões de Imperatriz, Chapadas Sul do Maranhão e Baixo Balsas, que se caracterizam pela utilização puramente comercial de suas áreas. Já o Grupo II compreendeu as microrregiões do Baixo Parnaíba Maranhense,

⁸⁶ Conforme destaca Paludzyszyn Filho (1995), em 1977 foi realizado o cultivo de 32 hectares de soja pelo senhor Leonardus Phillipsen, que marcou o início da produção comercial da soja nos cerrados do sul maranhense. Porém não houve retorno financeiro por falta de aparato tecnológico apropriado e adaptado às características edafoclimáticas, fato que resultou em tratativas para a inserção dessa cultura agrícola na área, com a criação de um polo do Centro Nacional de Pesquisa de Soja (CNPSo) em Balsas.

⁸⁷ Em 1976 o governo do Maranhão criou a Empresa Maranhense de Pesquisa Agropecuária, e, a partir de 1978, em parceria com a CNPSo, coordenou um estudo para a inserção da soja no Maranhão.

⁸⁸ Campos (2015, p. 131) destaca que a primeira semente de soja, adaptada ao cerrado maranhense foi desenvolvida com ajuda do pesquisador da Embrapa, Irineu Alcides Bays. Uma unidade foi instalada, em 1986, e a centralidade da atividade foi o melhoramento de sementes. A abrangência dessa unidade da Embrapa se estende pelos estados do Piauí (sul) e Tocantins (nordeste), nas zonas consideradas de influência da expansão da soja sobre os Cerrados da região. O resultado prático mais palpável do trabalho dessa unidade da Embrapa foi a geração/adaptação de 36 sementes de soja específicas para a região.

⁸⁹ As principais atividades econômicas maranhense tinham como base o extrativismo do babaçu e a rizicultura, e ambos se encontravam em estagnação, afetados principalmente pela elevada taxa de desmatamento da palmeira, que comprometia a o parque industrial dessa oleaginosa, e pelas condições de climáticas que provocaram perdas significativas para a produção do arroz e estagnação da economia setor agropecuário (MARANHÃO, 1983).

Mearim e Itapecuru, as quais caracterizou-se pela inserção de pequenas propriedades com objetivo de atender a demanda da pequena produção, que incluía também a soja⁹⁰ (MARANHÃO, 1983).

Soma-se a todo esse processo, a atuação de agricultores migrantes⁹¹, principalmente do sul do país, que foi fundamental para a consolidação da mesorregião Sul Maranhense (em especial o município de Balsas), como uma das novas frentes de expansão da agricultura moderna do estado. A chegada do migrante deu-se sob a atuação do governo maranhense que, em conjunto com o governo federal, elaborou mecanismos para atrair grupos econômicos, principalmente do sul e do centro-oeste do país, onde se pode destacar incentivos fiscais e linhas de créditos subsidiados que, somados aos preços baixos das terras, foram essenciais para a modernização das atividades agropecuárias tradicionais (arroz) e para a produção de culturas modernas, como a produção da soja. (Ferreira, 2008a; Ferreira, 2008b; Cunha, 2015).

É a partir dos primeiros anos da década de 1990 que a porção sul do Maranhão (em especial o município de Balsas) se aparelha para a produção de soja em larga escala. Mediante cooperação técnica e financeira entre diferentes órgãos⁹², ampliação de pesquisas com a soja foram intensificadas no Maranhão, visando ampliar sua área de produção com objetivo de ampliar o mercado de commodities agrícolas do estado, principalmente para exportação (Ferreira, 2008b).

Em paralelo realizaram-se também levantamentos referentes a questões de logística e infraestrutura e resultou na criação do Programa Corredor de Exportação Norte⁹³ (figura 45). Embasados nos estudos da EMBRAPA e apoiados na infraestrutura da CVRD, presença de recursos humanos e características edafoclimáticas favoráveis à produção de grãos em larga escala, esse projeto proporcionou retorno do crédito agrícola, investimentos para a correção do solo, crédito de custeio das safras e comercialização da produção a preço internacional ampliou a área de soja no estado (Almeida, 2017).

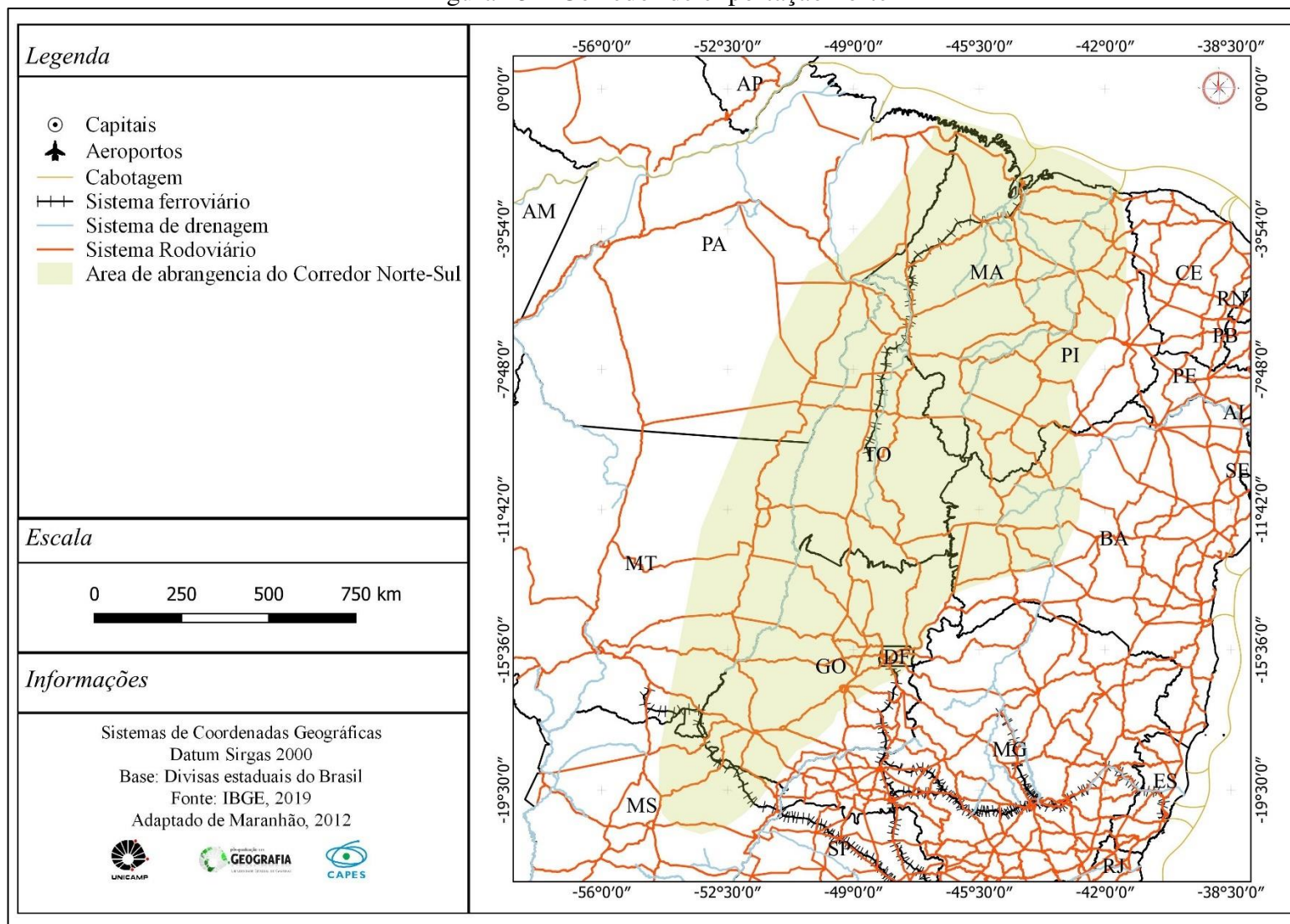
⁹⁰ Em Maranhão (1983) destacam-se que uma das iniciativas associadas a programas executados no Grupo II seria a elaboração de programas de extensão rural voltados à inclusão da soja na dieta alimentar dos rurícolas maranhenses.

⁹¹ Em sua tese de doutorado, Alves (2006) denomina de agentes modernizadores contemporâneos os primeiros migrantes que chegaram ao sul do Maranhão a partir da década de 1970. O referido autor salienta que os registros históricos apontam o ano de 1974 como início do desembarque das primeiras famílias, oriundas principalmente do sul do país, nos cerrados maranhenses, após a visita do então prefeito de Balsas ao Rio Grande do Sul, a fim de divulgar o potencial que o município apresentava para produtores gaúchos. Contudo, é a partir de 1980 que se tem um grande potencial para a expansão da agricultura.

⁹² Destaca-se a Companhia Vale do Rio Doce, EMBRAPA, Banco do Brasil, Secretaria de Desenvolvimento Regional, Banco do Nordeste, Banco da Amazônia (BASA), Banco do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES)

⁹³ Segundo Paludzyszyn Filho (1995 p. 8), a participação da CVRD foi decisiva, pois viabilizou a construção da infraestrutura necessária para o embarque e o transporte pela ferrovia Norte-Sul e Carajás, e armazenagem no Terminal da Ponta da Madeira em São Luís. Essas ações foram acompanhadas da iniciativa por parte do governo do estado, como a redução do ICMS da soja, que resultou em um diferencial positivo de US\$ 2,5 por saca, em comparação a preços anteriores a 1991.

Figura 45 – Corredor de exportação norte



Fonte: adaptado de Maranhão (2012)

O Corredor de Exportação Norte (ou Corredor Central Norte-Sul) corresponde a um sistema multimodal, que interliga o Brasil Central ao Norte/Nordeste, através da Hidrovia Araguaia-Tocantins, da Ferrovia Norte-Sul e da Estrada de Ferro Carajás. Integrado ao sistema rodoviário convencional (BR-135 e BR-230), ao sistema ferroviário da Companhia Ferroviária do Nordeste (CFN) com o exterior e com o restante do país via cabotagem, por meio do Porto do Itaqui e Ponta da Madeira, integrando extensa região do país, que abrange os estados do Maranhão (sul), Piauí, Pará (sudeste), Tocantins, Mato Grosso (leste), Goiás (nordeste) e Bahia.

Ferreira (2008b) destaca também a criação da Fundação de Apoio à Pesquisa do Corredor de Exportação Norte “Irineu Alcides Bays”- FAPCEN, em 27 de abril de 1993. Uma empresa privada, criada para representar os empresários do agronegócio nas áreas de pesquisa e extensão privada, dos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins. Cabe destacar que essa empresa, a partir da parceria com a EMBRAPA-SOJA, foi essencial no desenvolvimento de novas tecnologias e cultivares de soja adaptados às condições fisiográficas da região, e resultou em um significativo aumento da produtividade da soja.

Além do investimento em pesquisas com soja e outros cultivares de segunda safra, Almeida (2017) assinala ainda a importância da criação de programas voltados a ampliar o sistema de estradas da porção sul do Maranhão, com objetivo de melhorar o sistema de escoamento da produção agrícola. Esses programas foram, do mesmo modo, fundamentais para a expansão de novas áreas destinadas ao cultivo de grãos, tendo em conta que a presença de infraestrutura dinamiza o processo de produção e consequentemente amplia a produtividade.

Dentre os programas voltados a melhorar as estradas do Sul do Maranhão, o autor destaca o projeto Rodovias Brasil II, que foi responsável pelo melhoramento e pavimentação da estrada que liga os municípios de Balsas a Alto Parnaíba (MA-XX), integrando assim os três maiores produtores de commodities do Maranhão, o qual contou com um financiamento de 79 milhões de dólares disponibilizados pelo Banco Mundial e tendo como órgão responsável o Departamento de Estradas de Rodagem do Maranhão-DERMA (Almeida, 2017).

Além da série de políticas públicas e programas governamentais de incentivo à expansão da agricultura no sul do Maranhão, já citados, merece destaque o Programa de Cooperação Nipo-Brasileira de Desenvolvimento dos Cerrados-PRODECER III. O PRODECER foi um programa de cooperação entre o governo brasileiro e o japonês com o objetivo de ampliar a área de produção de commodities agrícolas mediante a concessão de crédito, pesquisa, tecnologia e infraestrutura (transporte e armazenamento) (Pires, 2006).

Implantado no período que Ferreira (2008a) denominou de políticas territoriais contemporâneas, o PRODECER III teve início a partir de 1995 e foi finalizado em 2001,

tendo como recorte territorial parte dos cerrados do Maranhão e Tocantins, cujos polos foram os municípios de Balsas⁹⁴ (MA) e Pedro Afonso (TO) (Piris, 2000; Inocêncio, 2010). O PRODECER III representou a continuidade do projeto de incorporação dos cerrados brasileiros no circuito de produção de larga escala, sendo antecedido por outros programas como o Polo Nordeste, PRODECER I e PRODECER II.

Segundo Mandujano (2015), a implantação do PRODECER III foi estratégica para a expansão e a consolidação da agricultura no sul do Maranhão e norte do Tocantins, pois instalou as bases tecnológicas e os investimentos necessários para a composição de um sistema produtivo solidificado, que teve como característica a ocupação de áreas planas que facilitaram a intensificação pelo uso de maquinários, o preço atrativo das terras e as questões de logística, principalmente a proximidade de rodovias e estrada de ferro Carajás, que favoreceu no processo de escoamento da produção a partir do porto do Itaqui e da Madeira em São Luís.

No Maranhão o PRODECER III compreendeu o Projeto de Colonização dos Gerais de Balsas-PC-Gebal, sob a responsabilidade da Cooperativa Agropecuária Batavo do Paraná e da Companhia de Promoção Agrícola, e encontrava-se situado a 790 km da capital São Luís, 400 km de Imperatriz e a 200 km da sede municipal de Balsas, e incorporou uma área de 80 mil ha, dos quais 40 mil hectares foram destinados à exploração por 42 colonos e consumiu cerca de US\$ 153,2 milhões, dos quais 60% foram oriundos do governo japonês e 40% do governo brasileiro, dos quais 30% seria proveniente do Tesouro Nacional e 10% do sistema de crédito normal, sendo a CAMPO financiadora principal (Cunha *et al.*; 1993; Ferreira, 2008a; Santos, 2012; Almeida, 2017).

Conforme Cunha *et al.* (1993) e Alves (2006), os investimentos advindos do PRODECER foram voltados à aquisição de terras e maquinários para os produtores e custeio na instalação de silos e armazéns para a estocagem de grãos, sobretudo da soja, mas também arroz, milho e fruticultura. Entretanto, o projeto não avançou, o sistema cooperativista se desintegrou anos depois, e suas terras foram vendidas principalmente para a SLC Agrícola, uma empresa de grade porte do setor agrícola com foco na produção de soja.

É importante destacar que, mesmo após o encerramento das atividades relacionadas ao PRODECER III, a área continuou a apresentar expressivos números em relação ao cultivo da soja. Segundo Alves (2006), isso se deu porque PRODECER III se

⁹⁴ Conforme destaca Mandujano (2015), o município de Carolina (MA) foi inicialmente escolhido como estratégico para a inserção do PRODECER no sul do Maranhão, por constituir-se historicamente como rota de transportes de mercadorias pelo rio Tocantins e por possuir uma infraestrutura mínima necessária para a chegada de investimentos, interligação viária e hidroviária pelo rio Tocantins. Porém, fatores como elevada fragmentação das terras em vários proprietários e o solo arenoso para cultivo foram entraves que fizeram com que Balsas surgisse como um polo, principalmente por já ser considerado área consolidada de produção agrícola., principalmente arroz e milho.

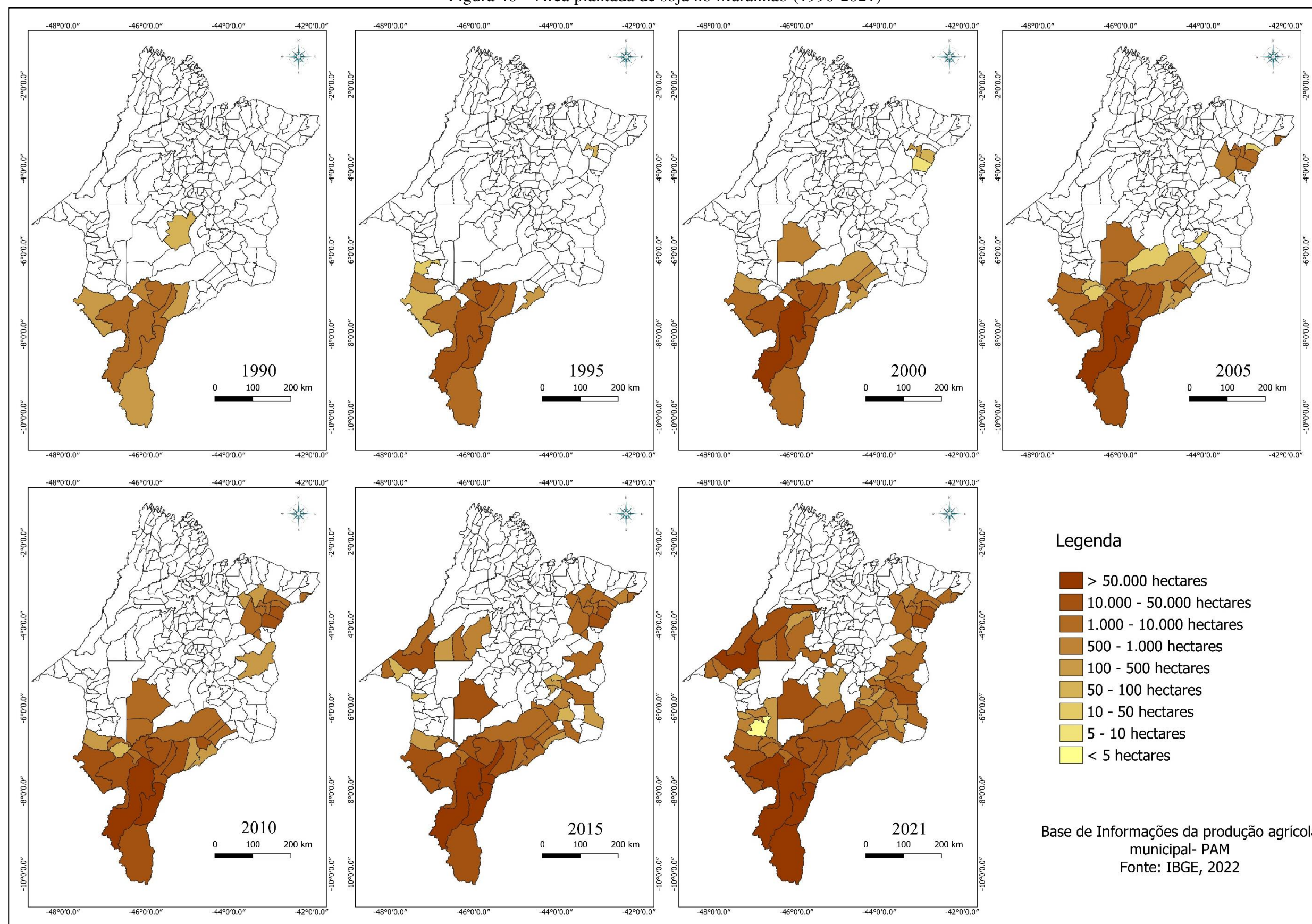
tornou um “chamariz” para produtores de outras regiões que viram no sul do Maranhão oportunidade para a inserção dessa cultura anual.

Atualmente, o Maranhão é o sexto maior produtor dessa commodity no país, com valores de produção que ultrapassam os estados do Piauí e do Tocantins. A soja, até o ano de 1995, correspondia a apenas 4,34% de toda a área plantada do Maranhão. Em 2000 a cultura passou a representar 14,136%, em 2010 a 28,06% e atualmente corresponde a 56% de toda a área plantada e 40% de toda a produção do estado com uma área de 1.023.541 hectares, na qual tem apresentado expectativas de crescimento para os próximos 10 anos (IBGE, 2021; CONAB, [s.d.]).

Em contrapartida, o arroz apresentou queda considerável ante o principal produto de exportação do Maranhão, com perdas significativas diante da produção dos produtos de melhor desempenho comercial, como a soja e o milho, considerando que grande parte do arroz produzido no Maranhão era considerado de qualidade inferior, consumido, em geral, nos mercados internos, com maior quantidade exportada para os estados do sudeste, principalmente o Rio de Janeiro (Ferreira, 2008a).

Esse dado é refletido na distribuição espacial de área plantada de soja no estado. Como observado na figura 46, a soja apresentou crescimento substancial, superando inclusive culturas tradicionalmente cultivadas no Maranhão (como o arroz, a mandioca e o milho), e tem na mesorregião Sul do Maranhão polo produtivo estadual, mesmo com a finalização do PRODECER III a partir de 2001, reflexo do aumento da demanda global por grãos e do investimento privado, além de incentivos fiscais e crédito rural associados até os dias atuais.

Figura 46 – Área plantada de soja no Maranhão (1990-2021)



Fonte: adaptado de IBGE (2022)

Na área o cultivo da soja apresentou crescimento gradativo a partir de 1995. Até 2005 praticamente toda área destinada ao cultivo desse grão encontrava-se na mesorregião Sul do Maranhense, quando se observa uma leve desaceleração da expansão no sul do Maranhão, principalmente a partir dos anos 2000, e observam-se iniciativas de deslocamento da fronteira agrícola moderna em direção às porções centrais e leste do Maranhão, formando novos polos produtivos regionais, onde se sobressaem as microrregiões de Chapadinha, Alto Mearim, Grajaú e Baixo Parnaíba. A partir de 2013 se consolida uma nova frente de expansão, para o noroeste do estado, com o município de Açailândia apresentando crescimento gradativo de área destinada ao cultivo da soja.

Esse processo resultou em significativas mudanças no arranjo espacial e, conseqüentemente, transformou a mesorregião Sul Maranhense em um dos principais polos agropecuários nacionais com economia internacional (Ferreira 2008a, p. 186), cuja referência é o município de Balsas (Mandujano, 2013, IBGE, 2019).

4.3.3 Expansão agrícola na mesorregião Sul Maranhense

A mesorregião Sul Maranhense, como já discutido, corresponde ao principal polo de produção agrícola do estado do Maranhão. Sua consolidação se deu por diferentes fatores, como características ambientais – principalmente condições topográficas, pedológicas e climáticas favoráveis –, programas de expansão agrícola, processos migratórios, que, somados ao empreendedorismo dos produtores, criaram as bases para a consolidação da agricultura no local. Dotado de alto nível tecnológico, o processo de expansão agrícola da área teve como base a inserção em larga escala, principalmente de culturas temporárias, nas quais tem protagonismo a soja (*Glycine max*), mas também o milho (*Zea mays*) e a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*).

Dados do PAM/IBGE (2022) mostram que a área destinada ao cultivo agrícola apresentou elevada taxa de ganho entre 1990 e 2021, passando de 146 mil hectares para 1,1 milhões de hectares, sendo a soja responsável por mais de 60% de toda área plantada, seguida pelo milho (29%), algodão (2%), cana-de-açúcar (2%) e arroz (1%). Quando se analisa a expansão da soja no sul maranhense na safra de 1988, a área plantada no estado da mesorregião Sul Maranhense foi de 14.256 hectares, que rendeu uma produtividade de 25.720 toneladas.

Esse número representou 99,70% de toda a área plantada com soja no estado do Maranhão, na qual o município de Balsas sozinho correspondeu a 50% de toda a produção de soja para o ano analisado. Entre 1995 e 2001 (período de predomínio do PRODECER III), a mesorregião Sul apresentou crescimento significativo de área destinada ao cultivo da soja, com incremento superior a 400%, quando comparados a anos anteriores à instalação do

PRODECER. Em 1995 foi registrada uma área plantada com cultivo de soja de 87.690 hectares que rendeu uma produtividade de 162.375 toneladas, já em 2001 foi registrado 209.868 hectares e produtividade de 482.274 toneladas. Na safra de 2010 observou-se que a área plantada de soja foi de 434.090 hectares.

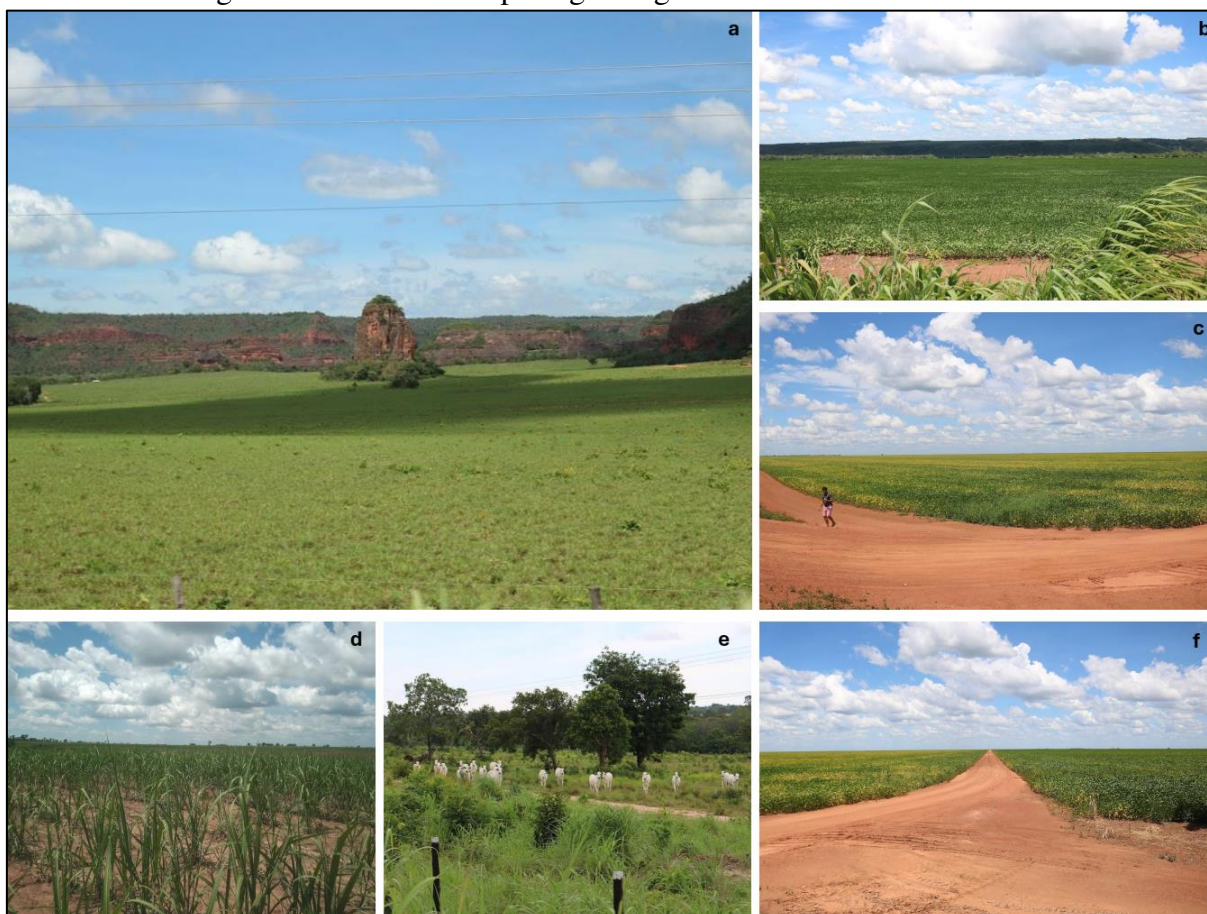
Em 1992, a soja representava apenas 3,47% de toda a área plantada, após 1995, quando ocorreu as primeiras iniciativas de implantação do PRODECER III, a área destinada passou a representar 46,16%, alcançando números superiores a 68% em 2001, ano de encerramento das atividades associadas ao PRODECER, chegando a 79% em 2022. Atualmente o cultivo corresponde a mais de 85% de toda a área plantada, produzindo grande parte nos municípios de Balsas, Riachão, Tasso Fragoso, São Raimundo das Mangabeiras e Sambaíba (IBGE, 2022).

Em contrapartida, observou-se significativa taxa de redução de outras culturas, tradicionalmente cultivadas na porção sul do estado, a exemplo do arroz que, conforme Ferreira (2008a), até o ano de 1992 era considerado a principal cultura agrícola do sul maranhense, quando chegou a corresponder por mais de 66% toda a produção agrícola da área. De acordo com dados do IBGE (2022), em 1988 cerca de 75% de toda a área plantada na mesorregião Sul Maranhense foi destinada ao cultivo do arroz, sendo essa cultura majoritariamente predominante até o ano de 1994, quando sofreu redução significativa do cultivo, correspondendo atualmente a aproximadamente 3% de toda área cultivada.

Destaca-se que a mesorregião Sul Maranhense foi responsável por mais de 95% de toda área plantada no recorte temporal analisado, e os municípios de Balsas, Tasso Fragoso e São Raimundo das Mangabeiras corresponderam por mais de 90% de toda produção no recorte analisado. Em 2005 a produção na área destinada ao cultivo da soja ultrapassou os 350 mil hectares (350.899 ha) e a produtividade alcançou o total de 943.904 toneladas, chegando a 1.198.624 toneladas em 2010 e mais de 1.5 milhões de toneladas em 2021, com a soja responsável por mais de 75% de toda a produção (IBGE, 2022).

Grande parte dessa expansão ocorreu em áreas de vegetação natural, que formou a composição de uma paisagem extremamente homogênea (figura 47), mesclada por fragmentos florestais, que em geral encontram-se em processo de sucessão ecológica, fato observado a partir das duas atividades de campo realizadas nos anos de 2022 e 2023. Notam-se também elevadas taxas de desmatamento do bioma Cerrado, variável que o município de Balsas tem liderado nos últimos anos em relação aos números nacionais de desmatamento.

Figura 47 – Diferentes paisagens agrícolas do Sul Maranhense



(a) - campos de pastoreio de gado (pastagens plantadas) em Tasso Fragoso (MA), fotografia adquirida em 14 de fevereiro de 2023; (b) - agricultura da soja na área de abrangência da serra do Penitente entre os municípios de Balsas (MA) e Tasso Fragoso (MA), fotografia adquirida em 14 de fevereiro de 2023; (d) - cultivo da cana de açúcar em Campestre do Maranhão (MA), fotografia adquirida em 13 de fevereiro de 2023; (e) pastagem degradada no município de Riachão (MA), fotografia adquirida em 15 de fevereiro de 2023; (c, f) cultivo de soja em Balsas (MA) fotografia adquirida em 18 de fevereiro de 2023

Fonte: dados de pesquisa, fevereiro - 2023

A pecuária, outra importante atividade econômica dos municípios que compõem a mesorregião Sul Maranhense, apresentou crescimento expressivo entre 1990 e 2020, com aumento do efetivo bovino em mais de 140% (passando de 476.935 cabeças para 1.153.232 cabeças), com os maiores rebanhos nos municípios de Estreito, Riachão, Carolina, São João do Paraíso e Porto Franco que somados concentraram mais de 45% de todo o rebanho bovino da mesorregião Sul Maranhense.

Fatores como melhoramento de pastagens, utilização de espécies adaptadas às características edáficas e pedológicas, e outras técnicas de manejo, além de espécies com melhor adaptação ao cerrado, estão entre os motivos de expansão das pastagens na área, predominando principalmente na porção noroeste, onde se tem os municípios de Porto Franco, Riachão e São João do Paraíso.

5 RESULTADOS

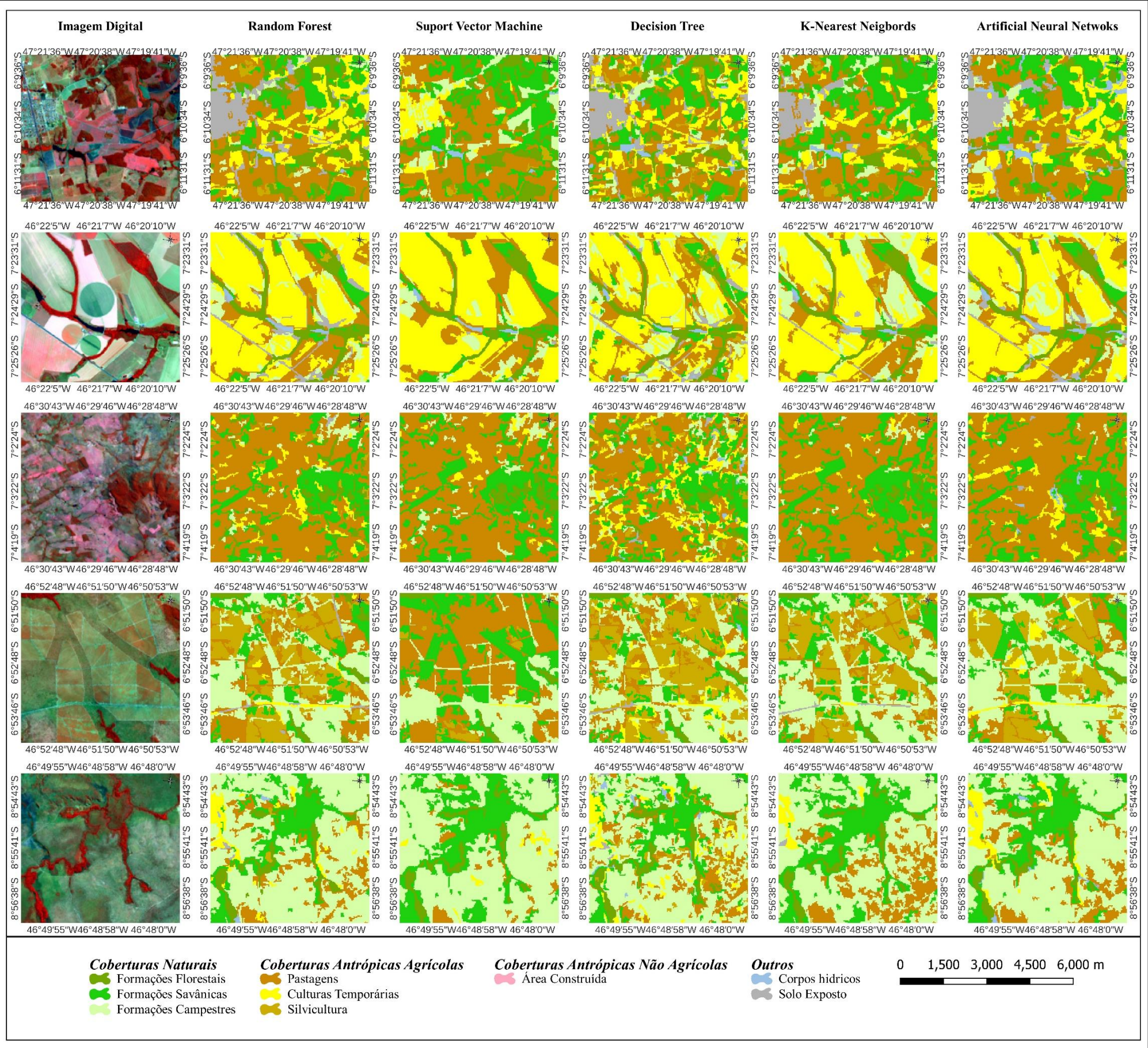
5.1 Dinâmica de uso e cobertura da terra entre 1990 e 2020 na Mesorregião Sul Maranhense

Serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na presente pesquisa, sendo: i) a validação e a acurácia das classificações dando ênfase também aos níveis de importância das variáveis utilizadas na composição das árvores de decisões no RF; ii) os percentuais de cobertura e uso da terra para a área estudada conforme o nível de acurácia dos dados e após a sua correção; iii) as principais transições entre classes no recorte temporal analisado e iv) um modelo de simulação e expansão da agropecuária a partir de autômatos celulares e pesos e evidências.

5.1.2 Escolha do Classificador

A escolha do melhor classificador está diretamente associada à capacidade do algoritmo definir padrões e assimilar características para a separabilidade de classes, principalmente em ambientes com elevada proximidade espectral, como ocorre na área de estudo. A figura 48 apresenta uma comparação entre os modelos de classificação gerados por cada algoritmo de classificação testado durante a etapa de escolha do classificador.

Figura 48 – Classificação por aprendizado de máquina para a mesorregião Sul Maranhense



Fonte: dados de pesquisa (2022)

Visualmente, todas as classificações, em maior ou menor proporção, mostraram relativa confusão entre as classes formações campestres e pastagens, formações campestres e agricultura e pastagens e agricultura, e, em menor proporção, nas formações savânicas, formações florestais e silvicultura. As métricas de validação são apresentadas nas tabelas 9 e 10, que apontam também que os classificadores tiveram desempenho relativamente significativa taxa de confusão para todos os classificadores, com erro médio variando entre 22% (RF) e 42% (SVM).

Tabela 9 – comparação de desempenho do f1-score

	RF	SVM	KNN	DT	ANN
FF	0.850	0.792	0.846	0.786	0.871
FS	0.785	0.727	0.762	0.675	0.770
FC	0.712	0.504	0.647	0.560	0.742
PAS	0.619	0.545	0.589	0.543	0.574
AGR	0.747	0.564	0.719	0.658	0.678
SIL	0.675	0.409	0.655	0.564	0.702
SE	0.703	0.136	0.703	0.647	0.770
CH	0.932	0.948	0.969	0.870	0.862
Média	0.753	0.578	0.736	0.663	0.746
E.G	74.08	61.47	71.43	64.37	72.95
Kappa	0,694	0,539	0,661	0,579	0,680

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Tabela 10 - Produtor e usuário

	RF		SVM		KNN		DT		ANN	
	Prod.	Us.	Prod.	Us.	Prod.	Us.	Prod.	Us.	Prod.	Us.
FF	0.83	0.88	0.71	0.9	0.82	0.87	0.78	0.8	0.84	0.90
FS	0.80	0.77	0.67	0.8	0.72	0.81	0.66	0.69	0.82	0.72
FC	0.76	0.67	0.48	0.53	0.63	0.66	0.62	0.51	0.76	0.73
PAS	0.66	0.58	0.57	0.52	0.62	0.56	0.58	0.51	0.68	0.49
AGR	0.7	0.8	0.56	0.57	0.73	0.71	0.62	0.7	0.59	0.79
SIL	0.73	0.63	0.78	0.28	0.75	0.58	0.57	0.56	0.74	0.67
SE	0.57	0.93	1	0.07	0.7	0.71	0.54	0.8	0.70	0.85
CH	0.89	0.98	0.96	0.94	0.98	0.96	0.93	0.82	0.78	0.96

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Todos os classificadores apresentaram excelente desempenho para a separação das formações florestais e formações savânicas com taxas superiores a 70%, sendo os RF e o ANN com desempenhos superiores a 80% c. Já as formações campestres apresentaram menor desempenho entre as formações naturais mapeadas em todos os classificadores, com taxa inferior 70% (exceto para o RF e o ANN que apresentaram exatidão superior a 70%), com os piores resultados obtidos na

classificação por SVM (com taxa de precisão de 48% apenas para essa classe) como mostrados em cor vermelha, nota-se também fraco desempenho para a identificação de pastagens na classificação associada ao algoritmo DT e corpos hídricos no algoritmo ANN

Já as formações antrópicas mostraram relativo erro de inclusão em todas as classificações, apontando significativa superestimação dessas classes. A taxa de acerto flutuou entre 56% (AGR com o SVM) e 70% (AGR com o RF), o erro de inclusão foi relativamente alto para todos os classificadores superiores a 20%, indicando que em todas as classificações ocorreu superestimação dessas classes.

Os melhores resultados foram obtidos na classificação resultante do algoritmo RF, com F1 Score médio de 0,753, E.G de 74,08%, e acurácia por classe superior a 60% (exceto pela classe solo exposto que apresentou acurácia de 57%). Esse classificador teve excelente desempenho para a identificação das formações savânicas (F1 Score 0,785), pastagens (F1 Score 0,619) e agricultura (0,747), porém, ao se analisar os erros de inclusão, nota-se que o RF apresentou erro de inclusão de 20% (AGR), 37% (SIL) e 42% (PAS), que indica relativa superestimação dessas classes ao utilizar o algoritmo RF, com significativa taxa de confusão com as classes formações campestres (entre 2% e 10%) e formações savânicas (entre 1,5% e 3,5%).

A classificação resultante do ANN apresentou a segunda melhor taxa de desempenho com F1 Score médio de 0,746 e E.G de 68%, com melhores índices para a separação de formações florestais (F1 Score de 0,871), solo exposto (F1 Score de 0,770) e silvicultura (F1 Score de 0,702), porém mostrou baixa taxa de precisão para a identificação de culturas agrícolas (F1 Score de 0,678), pastagens (F1 Score de 0,574) e corpos hídricos (F1 Score de 0,862). Assim como na classificação resultante do RF, a classificação resultante do algoritmo ANN também mostrou relativa taxa de confusão entre as classes antrópicas (PAS, AGR e SIL) com as formações campestres (entre 2 e 10%) e em menor com as formações savânicas (entre 2,5% e 9,5%).

O classificador KNN apresentou desempenho inferior ao RF e ANN, mas melhores que o DT e SVM, com F1 Score e E.G de 0,736 e 71,43% respectivamente, e a classificação resultante desse algoritmo apresentou erro de inclusão variando entre 13% (FF) e 44% (PAS). Dentre todos os classificadores analisados, o KNN apresentou o melhor desempenho para a identificação da classe corpos hídricos (F1 Score 0,969), no entanto, os piores resultados foram obtidos pelos classificadores SVM e DT.

O SVM apresentou taxa de exatidão global de 61,47% e valores de F1 Score médio de 0,578, com baixos resultados para todas as classes mapeadas, sendo as classes solo exposto (0,136), silvicultura (0,409) e formações campestres (0,504) os piores índices de F1

Score entre todos os classificadores analisados. Os erros de inclusão superaram os 10%, chegando ao patamar de 93% para a classe solo exposto e 72% para a classe silvicultura. O classificador DT apresentou o segundo pior resultado da análise, com exatidão global de 64,37%, F1 Score de 0,663, entre os classificadores, o DT e acurácia por classe inferior a 60% (com exceção dos corpos hídricos que apresentaram taxa de acurácia de 93%). O KNN, DT apresentaram taxas de exatidões globais de 71,43, 64,37%.

É importante destacar que, ao utilizar a métrica Kappa, os classificadores DT e SV apresentaram desempenhos considerados bons (entre 0,41 e 0,60), enquanto os classificadores RF, ANN e KNN foram qualificados como muito bons (entre 0,61 e 0,80). O teste z mostrou que, apesar de valores aproximados para o condicionante Kappa (RF=0,694; KNN = 0,680), existiu diferença estatística significativa entre as classificações resultantes do RF e ANN, como mostrados pelos testes de significância estatística entre valores kappa, a um intervalo de confiança de 95% ($Z > 1.96$), com um valor de $z = 0,7512$, entre os Kappas das duas classificações, da imagem Landsat 8 do ano de 2020, como mostrado na tabela 11.

Tabela 11 - Teste z para os classificadores utilizados

	DT	SVM	RF	ANN	KNN
DT	40.6745				
SVM	1.9554*	37.1701			
RF	-5.9679	-7.9468	53.4272		
ANN	5.2088	7.1821	0.7512*	53.4272	
KNN	-4.1899	-6.1539	1.7531*	1.0028*	49.0073

*Não significativo a uma taxa de confiança de 95% ($< 1,96$)

Fonte: Dados de pesquisa, 2022

Resultados semelhantes a esse estudo foram encontrados em Cruz e Oliveira (2021) que mostraram ligeira superioridade do algoritmo RF em comparação com o classificador paramétrico MaxVer (Kappa de 0,77 e de 0,41 respectivamente). Patsalidis, Agapiou e Hadjimitsis (2019), ao compararem o desempenho dos classificadores RF e MaxVer em imagens Sentinel-2 e Landsat 8 para o semiárido do Mediterrâneo, obtiveram melhor acurácia com a RF (Kappa de 0,850) em relação ao MaxVer (Kappa de 0,79).

Pereira *et al* (2021), por sua vez, na comparação de dados de classificação para Landsat 8 no cerrado maranhense em classificação por regiões, também identificaram a superioridade do RF para a diferenciação de classes de uso e cobertura da terra, quando comparados com o classificador C5.0, SAM e MD, com taxas superiores a 10% de acurácia. Holanda (2021), ao analisar acurácias de classificadores não paramétricos para o

mapeamento do cerrado mineiro, encontrou os melhores resultados para a classificação resultantes do algoritmo SVM quando comparados com algoritmos não paramétricos RF e DT, porém com diferenças inferiores a 1%.

Já Macarringue (2022) destaca que o uso do RF pode melhorar em até 20% o nível de precisão resultante da classificação de imagens, principalmente na discriminação de classes com elevada semelhança espectral, como as observadas no ambiente de cerrado. Desse modo, fundamentado no exposto, definiu-se o RF como algoritmo de classificação de imagem para esta pesquisa.

5.1.3 Parâmetros de ajuste do Random Forest

Na implementação do algoritmo Random Forest, o principal fator que afeta na qualidade da classificação do RF é a quantidade de árvores de decisões que são geradas (ntree). No scikit-learn, o m-tree é definido conforme o “*n_estimators*” que configura o método usado para a composição do parâmetro “*out-of-bag*” (OOB) e avalia a estimativa do erro do classificador (Manual do usuário [s.d]). Assim, a determinação do melhor ajuste do RF foi realizada conforme a minimização do erro OOB, geradas segundo diferentes combinações para o “*n_estimators*” (tabela 12).

Tabela 12 - acurácia conforme a mudança do número total de árvores de decisão

	<i>Kappa</i>	EG	F1 Score*
50	0.681	72.95	0.735
100	0.684	73.27	0.755
200	0.688	73.58	0.755
300	0.691	73.83	0.755
400	0.694	74.09	0.759
500	0.696	74.21	0.759
600	0.699	74.21	0.759
700	0.698	74.40	0.759
800	0.700	74.53	0.759
900	0.698	74.40	0.759
1000	0.698	74.40	0.759

* f1-score é resultante da análise da média ponderada gerada diretamente no sklearn.

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Ocorreu pequena variação entre as métricas de validação quando alterado o quantitativo de árvores de decisão. Os menores valores foram observados na classificação com 50 árvores (72,95%) e a maior exatidão com 800 árvores (74,53%), porém entre 400 e 1000 árvores não observaram mudanças consideráveis nas taxas de exatidão. Padrão semelhante é observado

também quando se analisa os valores de índice Kappa e F1 Score com relativa estabilização nos valores de exatidão a partir de 400 árvores.

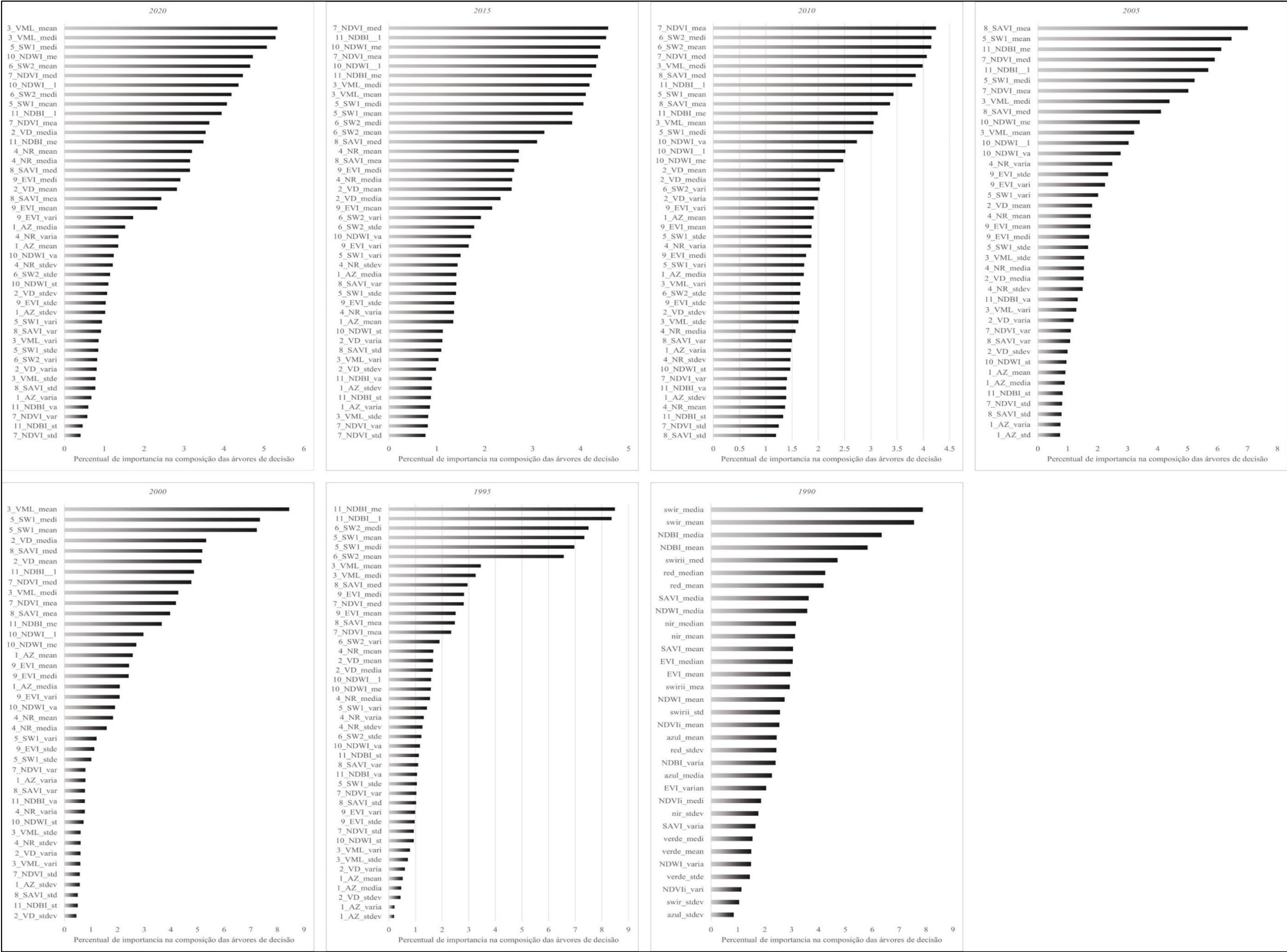
5.1.4 Importância das variáveis

Outra importante análise é a identificação das principais variáveis utilizadas no processo de construção das múltiplas árvores de decisões. Ressalta-se tal informação pois descreve quais recursos são relevantes na análise, possibilitando melhorar o tempo de processamento dos dados a partir da exclusão de variáveis que pouco influenciam no processo de construção das árvores de decisão (ntree).

No scikit-learn a identificação das variáveis de maior importância é calculada pela redução da impureza de Gini, uma técnica de inspeção que mede o quanto cada variável participa na construção de um modelo, a partir da diminuição da impureza do nó, utilizando taxas de precisão conforme as variáveis que são deixadas de fora da análise (amostras de OBB). Útil para a avaliação de precisão de modelos não lineares como os do tipo ensemble, considerando que essa técnica configura em embaralhar aleatoriamente os valores de um único dado e observar a degradação resultante da pontuação do modelo. Ao quebrar o relacionamento entre o recurso e o destino, é determinado o quanto o modelo depende desse recurso específico (Breimam, 2001).

A figura 49 ilustra, a partir da importância da permutação média, a contribuição das principais variáveis na construção das árvores de decisão para cada ano analisado.

Figura 49 – Importância das variáveis para a composição de cada árvore de decisão



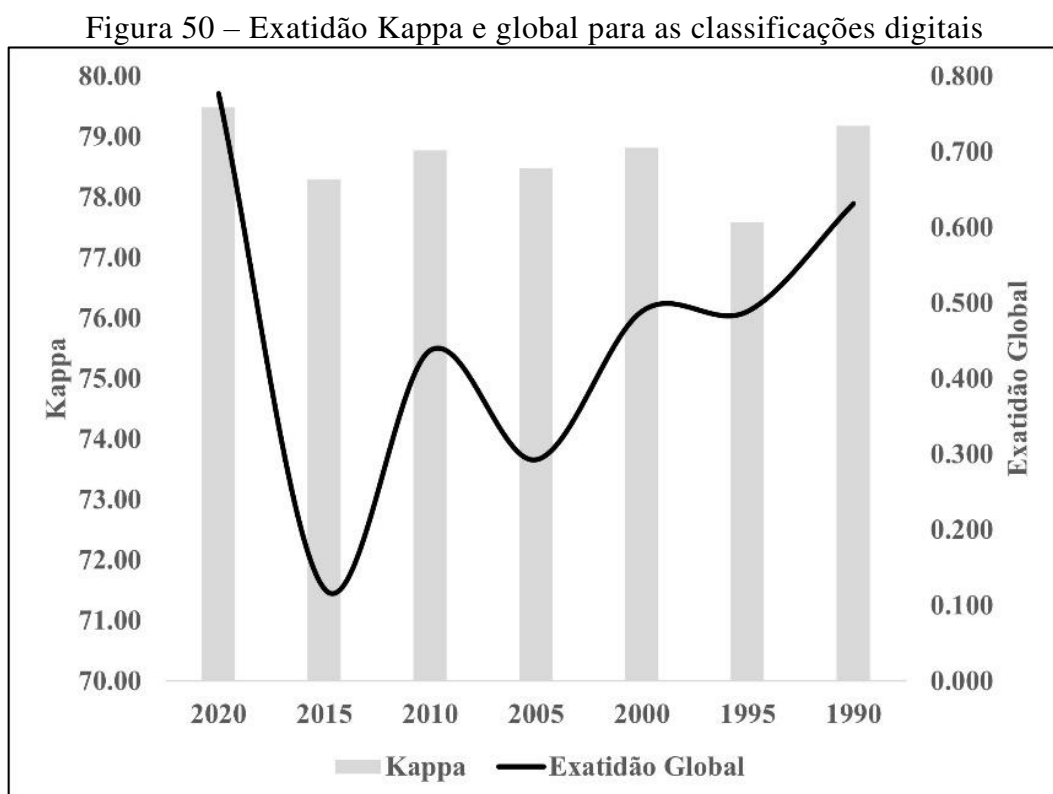
Fonte: dados de pesquisa, 2022

Pode-se observar que os índices de vegetação contribuíram significativamente para a construção das árvores de decisão, estando entre os principais atributos para a separação entre as classes, nos quais se destacaram a média do NDVI, média e mediana do NDWI, as médias e medianas do SAVI e média do NDBI. Dentre as bandas espectrais, destacaram-se as médias do vermelho e infravermelho próximo, com grau de importância entre 4 e 5% em todos os anos classificados.

Esse padrão é semelhante aos resultados observados em Macarringe *et al* (2022; 2023), que analisou os padrões de cobertura e uso da terra a partir de classificação de séries temporais de imagens L5 e L8 na porção norte de Moçambique utilizando o classificador RF, onde destacou que os índices de vegetação resultaram em melhores valores de acurácia de classificação.

5.1.5 Aplicação do modelo de classificação RF e Validação das classificações automáticas

Os mapeamentos resultantes das classificações das imagens Landsat 5 e Landsat 8 utilizando o algoritmo não paramétrico Random Forest-RF são mostrados na figura 50.



Fonte: dados de pesquisa, 2022

Conforme a tabela 13, não se tem uma variação significativa entre os Kappa e E.G resultantes das classificações, e os melhores resultados foram observados na classificação do ano de 2020, com Kappa de 0,759 e EG de 79,71% de acertos; já os piores índices de

validação foram registrados nas classificações de 1995 e 2015, com valores Kappa 0,607 e 0,664 e E.G de 76,11% e 71,53% que, apesar de baixos, encontram-se dentro dos limites de aceitação para classificação de imagens, como identificados nos testes de hipóteses em função dos resultados dos índices Kappa e variâncias Kappa, que mostraram que todas as classificações são significativamente maiores que zero, a um nível de confiança de 95%, que qualifica o uso do classificador RF e dados regionalizados para uso na classificação das classes de cobertura e o uso da terra para a área, indicando que possuem significância estatística.

Tabela 13 -Kappa e Variância Kappa das classificações

<i>Classificação</i>	<i>Kappa</i>	<i>Exatidão Global</i>	<i>Var.Kappa</i>	<i>Qualidade</i>
1990	0.734	77.89	0.00065	Muito bom
1995	0.607	76.11	0.00025	Muito bom
2000	0.705	76.11	0.00016	Muito bom
2005	0.678	73.66	0.00017	Muito bom
2010	0.702	75.47	0.00023	Muito bom
2015	0.664	71.53	0.00018	Muito bom
2020	0.759	79.71	0.00013	Muito bom

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Rodrigues (2018), em mapeamentos de uso e cobertura da terra para a Amazônia maranhense, encontrou acurácia variando de 0,75 e 0,85 em séries temporais Landsat 5 e Landsat 8, utilizando o algoritmo Árvore de Decisão C5.0. Já Rosa (2020), ao propor uma metodologia para classificação de cobertura da terra para a mata atlântica, encontrou acurácia superior a 80%, chegando a 93% com o uso do algoritmo Random Forest em classificação do tipo pixel a pixel. Daunt (2019), no mapeamento do litoral norte de São Paulo, usando imagens Landsat 5 e Landsat 8 pelo método Geobia e o algoritmo RF, encontrou E.G entre 76% e 81%, indicando a real capacidade de mapeamento de uso e cobertura da terra com o algoritmo RF.

As taxas de produtor e usuário referente as classificações das imagens Landsat 5 e Landsat 8 para a mesorregião Sul Maranhense, a partir do algoritmo RF, são mostradas nas figuras 51 e 52. Já a figura 53 apresenta os percentuais de confusões entre classes derivados das matrizes de confusão que mostram superestimação das classes pastagens, silvicultura e agricultura e subestimação das formações florestais e campestres.

Figura 51 – Acurácia de produtor para as classes de cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense (1990 -2020)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	produtor	Produtor	Produtor	Produtor	Produtor	Produtor	Produtor
FF	0.96	0.84	0.86	0.94	0.95	0.89	0.93
FS	0.91	0.82	0.83	0.77	0.87	0.84	0.83
FC	0.72	0.80	0.68	0.77	0.76	0.60	0.69
PAS	0.60	0.41	0.80	0.54	0.60	0.62	0.81
AGR	0.66	0.33	0.68	0.68	0.70	0.67	0.74
SIL					0.06	0.62	0.70
SE		0.68	0.52	0.74	0.80	0.90	0.85
CH	0.89	0.52	0.66	0.80	0.66	0.82	0.90

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Figura 52 – Acurácia de Usuário para as classes de cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense (1990 -2020)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	Usuário	Usuário	Usuário	Usuário	Usuário	Usuário	Usuário
FF	0.89	0.78	0.93	0.86	0.82	0.83	0.89
FS	0.94	0.67	0.75	0.69	0.69	0.67	0.83
FC	0.77	0.61	0.71	0.70	0.71	0.68	0.75
PAS	0.58	0.74	0.69	0.62	0.75	0.61	0.73
AGR	0.72	0.76	0.71	0.81	0.81	0.77	0.76
SIL	---	---	---	---	1.00	0.84	0.80
SE	---	0.67	0.73	0.79	0.78	0.55	0.86
CH	0.71	0.92	0.93	0.92	0.95	0.90	0.96

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Figura 53 – Taxas de confusões entre as classes para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020 (porcentagem)

1990 Validação									
Classificada	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	
FF	95.71	5.88	0.00	0.00	0.00			0.00	
FS	1.43	91.18	1.75	1.89	0.00			0.00	
FC	0.00	0.00	71.93	11.32	6.10			2.22	
PAS	2.86	2.94	5.26	60.38	15.85			6.67	
AGR	0.00	0.00	14.04	22.64	65.85			2.22	
SIL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	
CH	0.00	0.00	7.02	3.77	12.20			88.89	
1995 Validação									
Classificada	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	
FF	84.44	6.98	0.36	3.19	5.30		4.55	27.27	
FS	9.33	82.40	13.00	24.47	21.19		6.82	18.18	
FC	2.67	7.26	79.78	27.13	33.77		11.36	0.00	
PAS	1.33	1.96	1.81	41.49	5.96		6.82	2.27	
AGR	0.00	0.00	4.33	1.60	33.11		2.27	0.00	
SIL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	
SE	1.78	1.12	0.72	2.13	0.66		68.18	0.00	
CH	0.44	0.28	0.00	0.00	0.00		0.00	52.27	
2000 Validação									
Classificada	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	
FF	93.09	4.36	0.00	0.00	0.36	0.00	0.36	1.82	
FS	6.51	75.42	8.82	1.68	4.83	0.00	0.63	2.10	
FC	0.29	8.21	70.67	9.97	9.38	0.00	1.47	0.00	
PAS	1.41	7.39	11.62	69.37	5.28	0.00	4.58	0.35	
AGR	1.78	4.89	14.67	3.11	71.11	0.00	2.67	1.78	
SIL									
SE	0.00	0.00	17.07	0.00	9.76	0.00	73.17	0.00	
CH	2.44	4.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.68	
2005 Validação									
Classificação	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	
FF	93.53	4.87	0.00	4.82	1.78		0.00	5.36	
FS	3.60	76.92	4.99	21.69	11.39		0.00	7.14	
FC	0.36	7.69	76.54	14.76	9.96		3.51	0.00	
PAS	1.80	8.46	10.26	54.22	8.54		17.54	3.57	
AGR	0.00	1.54	7.04	3.61	67.62		5.26	0.00	
SIL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	
SE	0.36	0.00	0.88	0.90	0.71		73.68	3.57	
CH	0.36	0.51	0.29	0.00	0.00		0.00	80.36	
2010 Validação									
Classificação	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	
FF	95.19	5.47	0.47	1.83	2.56	33.33	0.00	9.38	
FS	4.28	87.11	9.43	16.44	7.69	39.39	0.00	18.75	
FC	0.00	3.52	75.94	13.24	10.26	9.09	7.50	6.25	
PAS	0.00	3.13	7.55	60.27	7.69	6.06	7.50	0.00	
AGR	0.00	0.39	6.13	6.39	70.26	6.06	5.00	0.00	
SIL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.06	0.00	0.00	
SE	0.00	0.39	0.47	1.83	1.54	0.00	80.00	0.00	
CH	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.63	
2015 Validação									
Classificação	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	
FF	89.18	5.04	0.39	0.71	2.74	10.39	0.00	0.00	
FS	5.19	83.72	10.89	9.96	6.10	6.49	1.92	13.64	
FC	0.43	3.10	59.92	10.68	7.93	5.19	0.00	0.00	
PAS	3.03	3.88	14.40	61.92	12.20	10.39	1.92	4.55	
AGR	0.43	0.39	11.67	8.90	66.77	3.25	5.77	0.00	
SIL	0.87	2.71	0.00	0.36	2.44	62.34	0.00	0.00	
SE	0.87	0.78	2.72	6.41	1.83	1.95	90.38	0.00	
CH	0.00	0.39	0.00	1.07	0.00	0.00	0.00	81.82	
2020 Validação									
Classificação	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	
FF	92.69	4.28	0.73	0.31	0.29	9.85	0.00	6.90	
FS	2.99	82.87	6.57	0.92	3.14	9.09	0.00	3.45	
FC	1.66	5.50	69.34	7.38	3.71	3.79	0.00	0.00	
PAS	1.00	2.75	10.22	80.62	14.57	3.03	7.69	0.00	
AGR	0.33	2.45	11.68	9.85	74.29	4.55	7.69	0.00	
SIL	1.33	1.83	0.36	0.00	3.43	69.70	0.00	0.00	
SE	0.00	0.31	0.73	0.92	0.29	0.00	84.62	0.00	
CH	0.00	0.00	0.36	0.00	0.29	0.00	0.00	89.66	

Fonte: Dados de pesquisa (2022)

As métricas de produtor e usuário mostraram que todas as classificações apresentaram desempenho relativamente alto para a identificação das coberturas naturais, com taxas de acerto variando entre 70% e 90%, e baixa taxa de acurácia para as coberturas antrópicas, com taxa de acerto variando entre 33% e 81%, indicando, em maior ou menor grau, superestimação dessas unidades, como mostrados pelos erros de inclusão que ficaram entre 10% e 20% (vide figura 53).

Na tabela 14 são apresentados os valores de F1 Score, as classes com valor inferior a 0,70 foram considerados com baixo nível de precisão para o padrão de cobertura da área, assim, notam-se as maiores inconsistências para a classe silvicultura com precisão média geral de 0,525, seguida pelas pastagens com precisão média de 0,68, formações campestres com 0,70 e culturas agrícolas 0,68 as classes com maiores padrões de erros na análise.

Tabela 14 – F1 Score das classificações

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	Média
FF	0.92	0.81	0.90	0.90	0.88	0.86	0.91	0.882
FS	0.93	0.74	0.79	0.73	0.77	0.75	0.83	0.790
FC	0.75	0.69	0.69	0.73	0.73	0.64	0.72	0.707
PAS	0.59	0.53	0.74	0.58	0.67	0.61	0.76	0.642
AGR	0.69	0.46	0.70	0.74	0.75	0.72	0.75	0.686
SIL					0.11	0.72	0.74	0.525
SE		0.67	0.61	0.76	0.79	0.69	0.85	0.729
CH	0.79	0.67	0.77	0.86	0.78	0.86	0.93	0.807

* Os primeiros registros da classe de Silvicultura foram observados a partir de 2010.

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Com exceção da classificação referente ao ano de 2005, que apresentou taxa de acurácia de 77%, as formações savânicas tiveram taxas de acerto superiores a 80%, porém os erros de inclusão – amostras de referência classificadas erroneamente na classificação – ficaram entre 17% e 34%, indicando superestimação dessa classe em quase todos os mapeamentos.

As formações campestres apresentaram exatidão de produtor superior a 75% para os mapeamentos referentes aos anos de 1990, 1995, 2005 e 2010, e inferior a 70% nas classificações de 2000, 2015 e 2020, com relativa subestimação dessa classe -o classificador teve dificuldade de separar essa classe-. Padrão semelhante é observado para as formações florestais que, em todos os anos analisados, apresentaram taxas de

acerto superior a 85% (exceção de 1995 com taxa de acerto de 84%), já a acurácia de usuário para essa classe apresentou taxa variando entre 83 e 93%.

As culturas agrícolas apresentaram taxas de exatidão superior a 65% (exceto para o ano de 1995, que apresentou taxa de acurácia de 33%), com os melhores resultados identificados no mapa de 2020 com taxa de acerto de 74%, seguidos pelo de 2010 com taxas de acerto de 70%.

Nota-se em todos os mapeamentos, significativa superestimação dessa classe, o que também ocorre com as Pastagens, que apresentaram taxa de acerto entre 41% (1995) e 81% (2020), porém essa classe apresentou erros de inclusão de até 39%, indicando significativa confusão com outras classes.

A silvicultura apresentou os piores resultados entre as coberturas antrópicas não agrícolas mapeadas, com taxa de precisão variando entre 6% (2010) e 70% (2020), porém é importante destacar que essa classe possui baixa representação espacial na área, o que dificulta a identificação dessa classe pelo classificador. As outras classes apresentaram taxas superiores a 65%.

Quando abordados os níveis de confusões entre as classes, identificou-se que as maiores inconsistências foram entre as formações campestres, pastagens e agricultura que apresentaram elevada taxa de confusão, variando entre 10% e 12%, em todos os anos analisados. Já a classe silvicultura apresentou significativa confusão com as formações savânicas e florestais, principalmente pelas características espaciais que essa classe apresenta.

A baixa taxa de concordância do F1 Score, produtor e usuário para essas classes pode estar relacionada a diferentes fatores, como o padrão de cobertura da classe na área, as condições ambientais do local, a baixa taxa de precipitação que influencia no comportamento espectral da área, pois as imagens foram selecionadas no período de estiagem (setembro a novembro) quando ocorre uma menor taxa de precipitação e, como consequência, uma maior semelhança espectral entre os alvos que compõem as imagens, a exemplos das pastagens, formações campestres, solo exposto e culturas agrícolas, ou mesmo a falhas no classificador de separar classes.

5.1.5 Correção manual de inconsistências

O uso da classificação por regiões possibilita a correção manual dos dados em áreas com significativa confusão, permitindo, assim, a melhoria dos dados e uma maior acurácia nos mapeamentos, o que é menos preciso em modelos de classificação por pixel, que sofre significativo efeito do chamado erro “*sal-pimenta*”. Após correção manual, as

classificações realizadas apresentaram melhoria significativa de todas as métricas analisadas, como apresentadas na tabela 15, onde os valores variam 71% (2010) e 79% (2020), apresentando melhoria em mais de 5%.

Tabela 15 - Comparação das exatidões corrigidas e brutas

	Brutas		Pós Correção	
	Kappa	E.G	Kappa	E.G
1995	0,607	76,11	0,697	76,45
2000	0,705	76,11	0,707	76,45
2005	0,677	73,65	0,773	81,65
2010	0,701	75,46	0,764	80,58
2015	0,663	71,52	0,822	85,17
2020	0,758	79,71	0,899	91,61

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Após a correção das inconsistências, apenas as classificações de 1995 e 2000 não apresentaram variações significativas das métricas de validação analisadas, principalmente pela baixa presença de classes antrópicas nesses anos analisados. Em 2020 houve aumento de 12% em relação à acurácia global e de 0,140 para o índice Kappa valores aproximados, observados também para o ano de 2015 e 2010.

5.2 Mapeamento do uso e cobertura da terra entre 1990 e 2020

Nesta seção serão apresentadas as principais transformações de uso e cobertura da terra ocorridas entre os anos de 1990 e 2020 na mesorregião Sul Maranhense, com recorte temporal de 5 anos (1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020). Cabe destacar que o período anterior a 1990 foi analisado conforme dados disponíveis pela coleção 6, resultante do mapeamento dos biomas brasileiros disponibilizados pelo projeto MAPBIOMAS⁹⁵ (MapBiomias, 2022), onde se identificou que no período anterior a 1990 mais de 95% da área era coberta por vegetação natural do cerrado – formações florestais, campestres e savânicas –, fator que justificou o marco inicial da análise a partir de 1990.

Tal período também foi escolhido por anteceder a implantação de grandes projetos de expansão da agricultura moderna na área – PRODECER III (1995-2003) e o PCEN (1998) –, como debatido por Gordiano (1999), Ferreira (2008a), Ferreira (2008b), Inocência (2010), Almeida (2017).

⁹⁵ O projeto MapBiomias é uma rede colaborativa formada por ONGs, universidades e Startups de tecnologia, que produz mapas anuais de cobertura e uso da terra, monitoramento da superfície de água e superfície de fogo mensalmente, com dados desde 1985. É elaborado também relatórios de desmatamento para cada ano detectado. Os dados estão disponíveis na página: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>

Conforme discutido nos capítulos anteriores, o bioma cerrado, historicamente, sofreu intensos processos de desmatamento e fragmentação florestal, com aproximadamente 50% da vegetação original já convertida em outras classes (Myers, 2000; Machado *et al.*, 2004; Matos, 2006; Sano *et al.*, 2009; Sano *et al.*, 2010; Vallejo (2010). Na área, a expansão da fronteira agrícola, apesar de considerada recente em comparação a outras áreas do bioma – com registros desde a década de 1970, e intensificada a partir de 1990 –, ocasionou rápidas mudanças espaciais, caracterizadas pela intensa substituição da vegetação natural de cerrado por monocultivos (predominando a soja, mas também o milho, a cana-de-açúcar e o algodão), pastagens plantadas e silvicultura, com predomínio do eucalipto – *Eucalyptus globulus* Labill – (Bayma-Silva *et al.*, 2015; IBGE, 2020).

Dentre os principais fatores que explicam o processo de expansão da agropecuária na área, estão as condições topográficas, climáticas e pedológicas⁹⁶ favoráveis para a mecanização e intensificação agrícola, a iniciativa estatal que, a partir de programas como o PRODECER III (1995-2002) e do Programa Corredor Exportação Norte (CVRD, 1998), possibilitou a ampliação do crédito de custeio das safras, subsídios para comercialização a preços de mercado mundial.

Pesquisas, ampliação e melhoria da infraestrutura de armazenamento, transporte e logísticas facilitaram o processo de escoamento da produção, a exemplo da BR 230 (Transamazônica) e outras rodovias secundárias (MA-006) que interligam as áreas produtivas do sul do estado a pontos de escoamentos da produção (Porto do Itaqui e Porto da Madeira), que, somados ao aumento da demanda externa, atraíram capital nacional e estrangeiro e formaram as bases para o processo de ampliação da área agrícola (Paludzyszyn, 1995), e foram essenciais para a transformação da área em um dos principais polos agropecuários nacionais.

Como resultado das políticas de expansão agrícola, a área se consolidou como grande produtora de commodities agropecuários (Ferreira, 2008a; Ferreira, 2008b), transformando os municípios que integram a mesorregião Sul Maranhense em uma das mais ativas frentes de expansão da fronteira agrícola nacional (Favareto *et al.*, 2019).

Esse processo tem resultado em significativas mudanças no uso e na cobertura da terra, caracterizadas por significativas taxas de redução da vegetação de cerrado (Bayma-Silva *et al.*, 2015; Bayma-silva *et al.*, 2017), tendo atualmente quatro⁹⁷ entre os trinta municípios

⁹⁶ Os solos dos cerrados, em geral, necessitam de correção e adubação química, pois apresentam textura argilosa a média em solos antigos, profundos e significativamente lixiviados, correspondendo principalmente a Latossolos e Argissolos.

⁹⁷ Conforme dados disponibilizados pelo INPE (2023), as somas das áreas desmatadas nos municípios de Balsas, Alto Parnaíba, Riachão e Carolina corresponderam a aproximadamente 7% de toda área de cerrado desmatada em 2022.

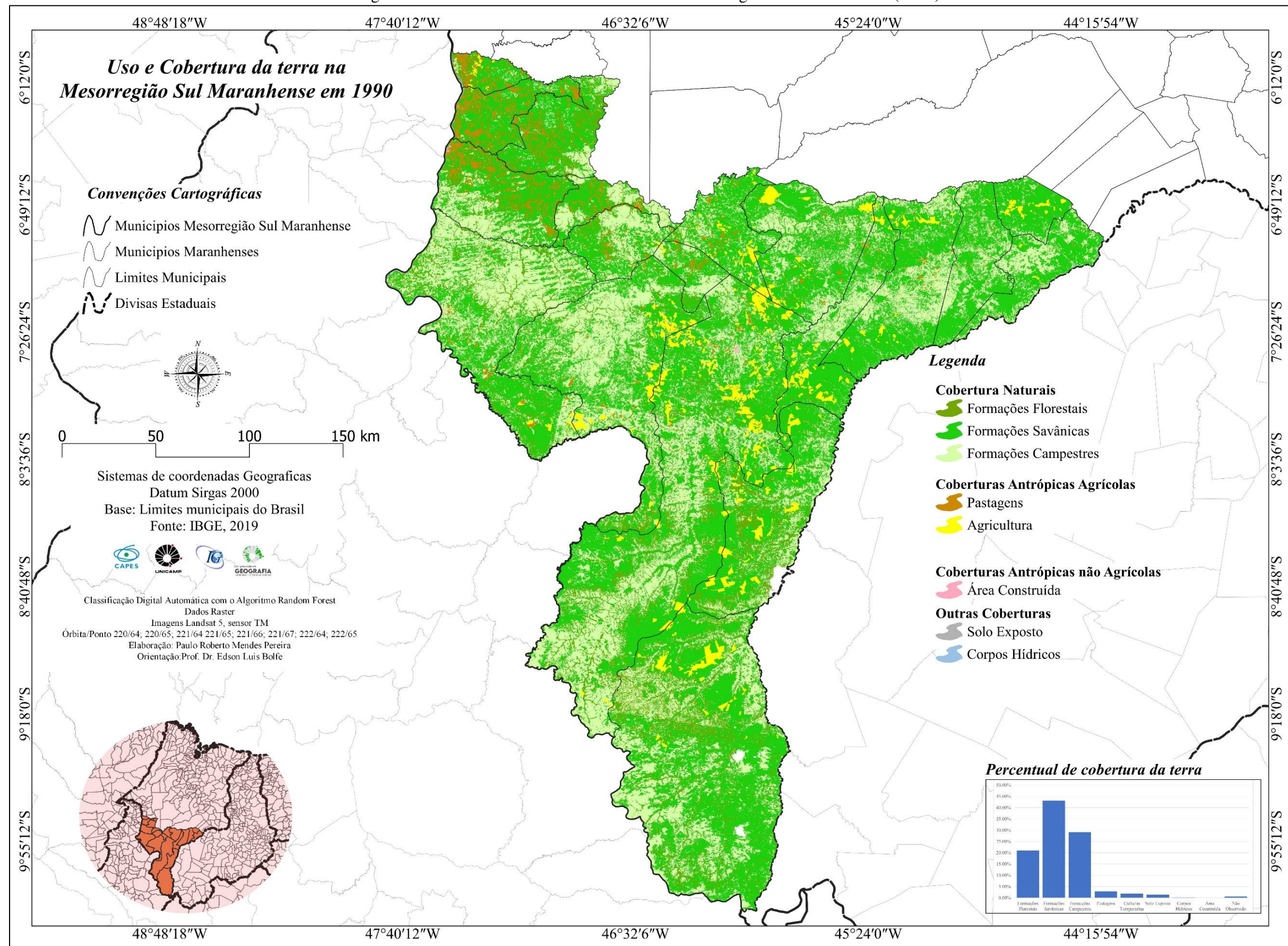
que mais desmataram o cerrado (INPE, 2023), fator que tornou a agropecuária um vetor de transformação da paisagem local.

Desse modo, a geração dos mapas de uso e cobertura da terra para a área, a partir do uso de imagens Landsat 5 e Landsat 8, possibilitou não apenas a quantificação das categorias mapeadas nos anos analisados, mas também a identificação da evolução espaço temporal das principais classes que caracterizam a paisagem da área e a caracterização dos processos de perdas, ganhos e pertinência durante cada intervalo de tempo analisado (1990-1995; 1995-2000; 2000-2005; 2005-2010; 2010-2015; 2015-2020 e 1990-2020).

Essas informações também são importantes para a criação de cenários de mudança de uso e cobertura da terra (Soares-Filho, 1998; Almeida, 2004; Soares-Filho *et al.*, 2007; Benedetti, 2010; Bueno, 2018; Machado, 2022), pois possibilitam as tendências e as direções espaciais de mudanças podendo subsidiar tomada de decisões em esferas governamentais.

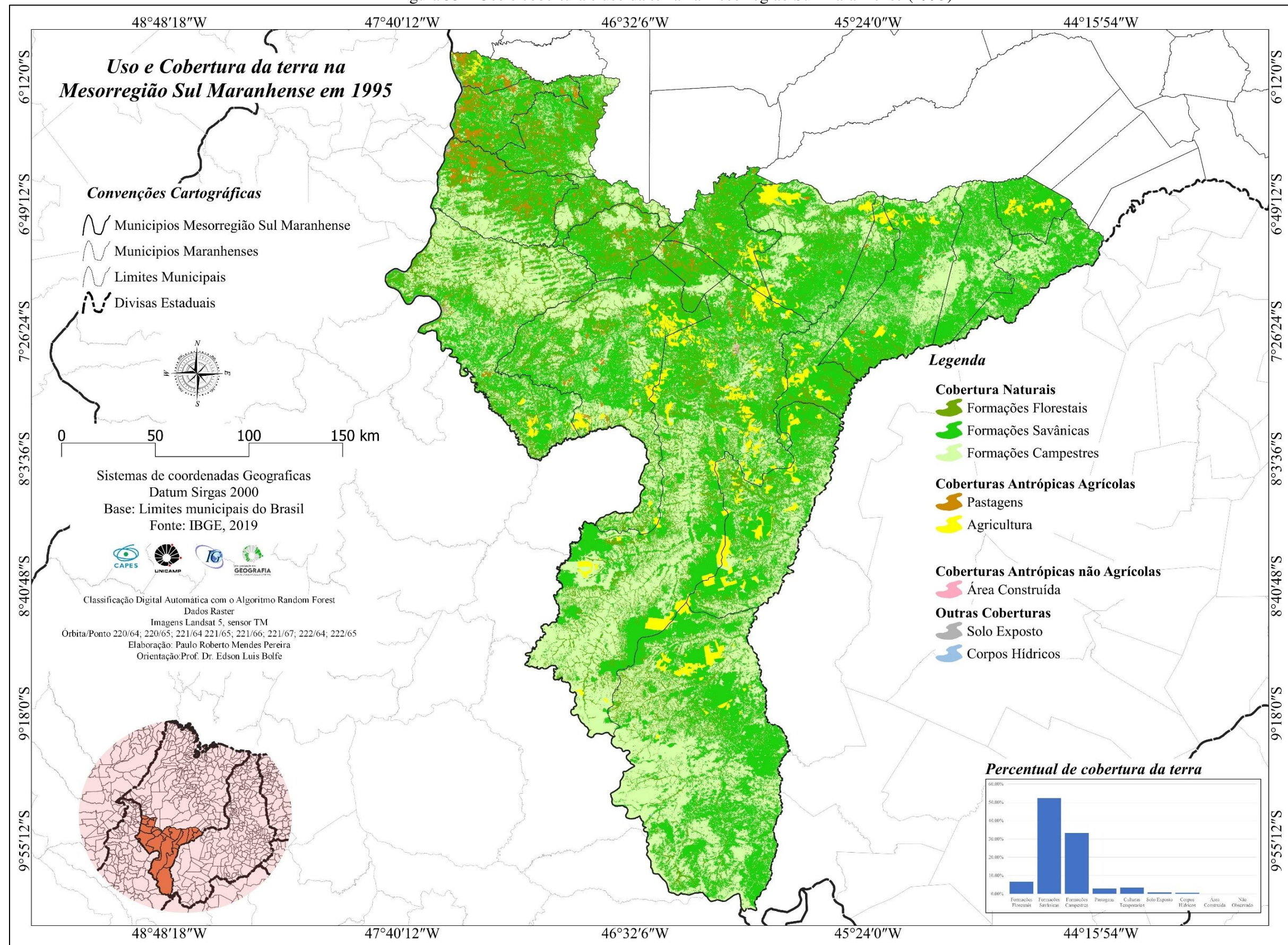
As figuras 54 a 61 apresentam os resultados das classificações de uso e cobertura da terra para a mesorregião sul.

Figura 54 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (1990)



Fonte: dados de pesquisa (2021)

Figura 55 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (1995)



Fonte: dados de pesquisa (2021)

Figura 56 — Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2000)

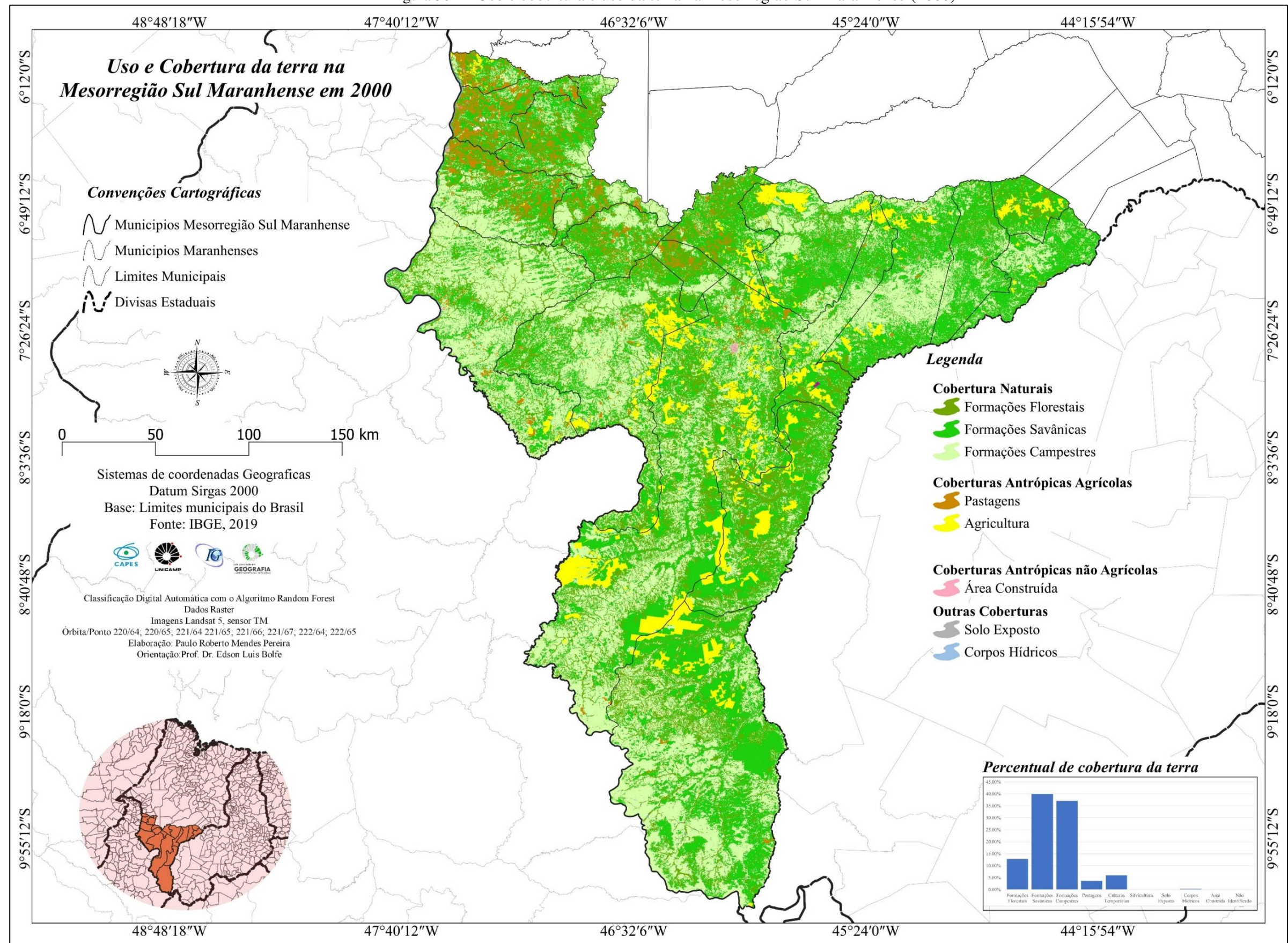
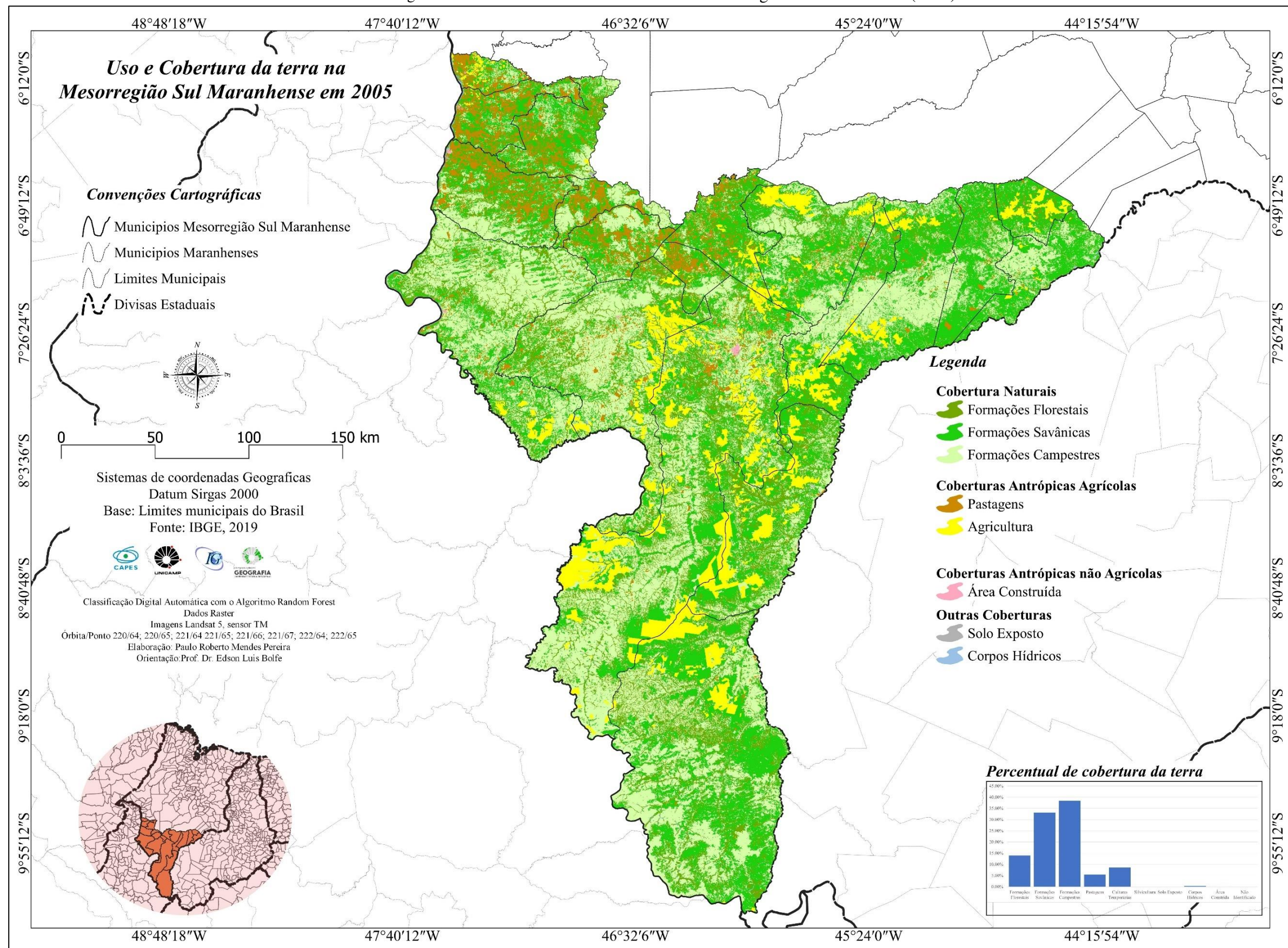
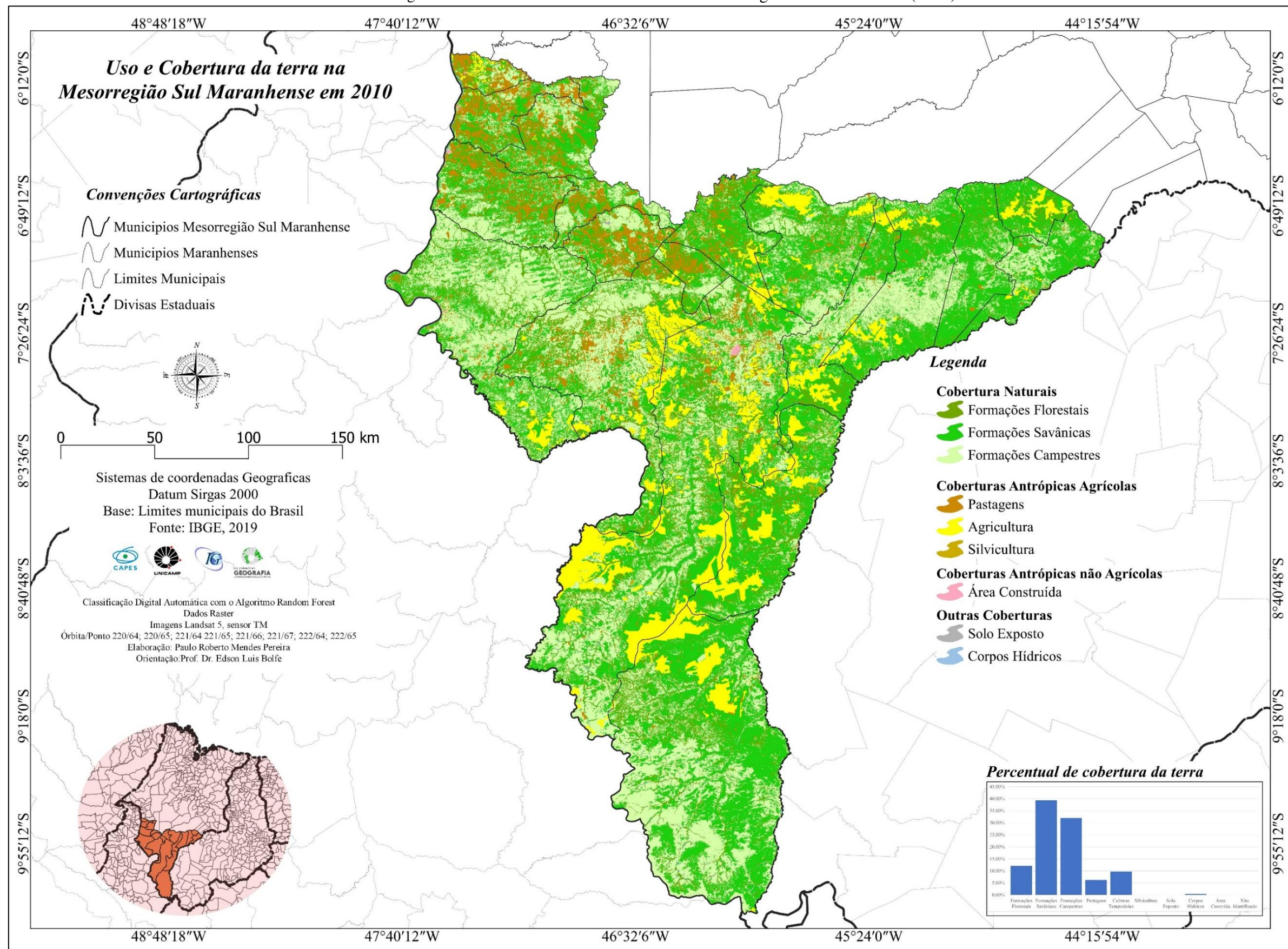


Figura 57 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2005)



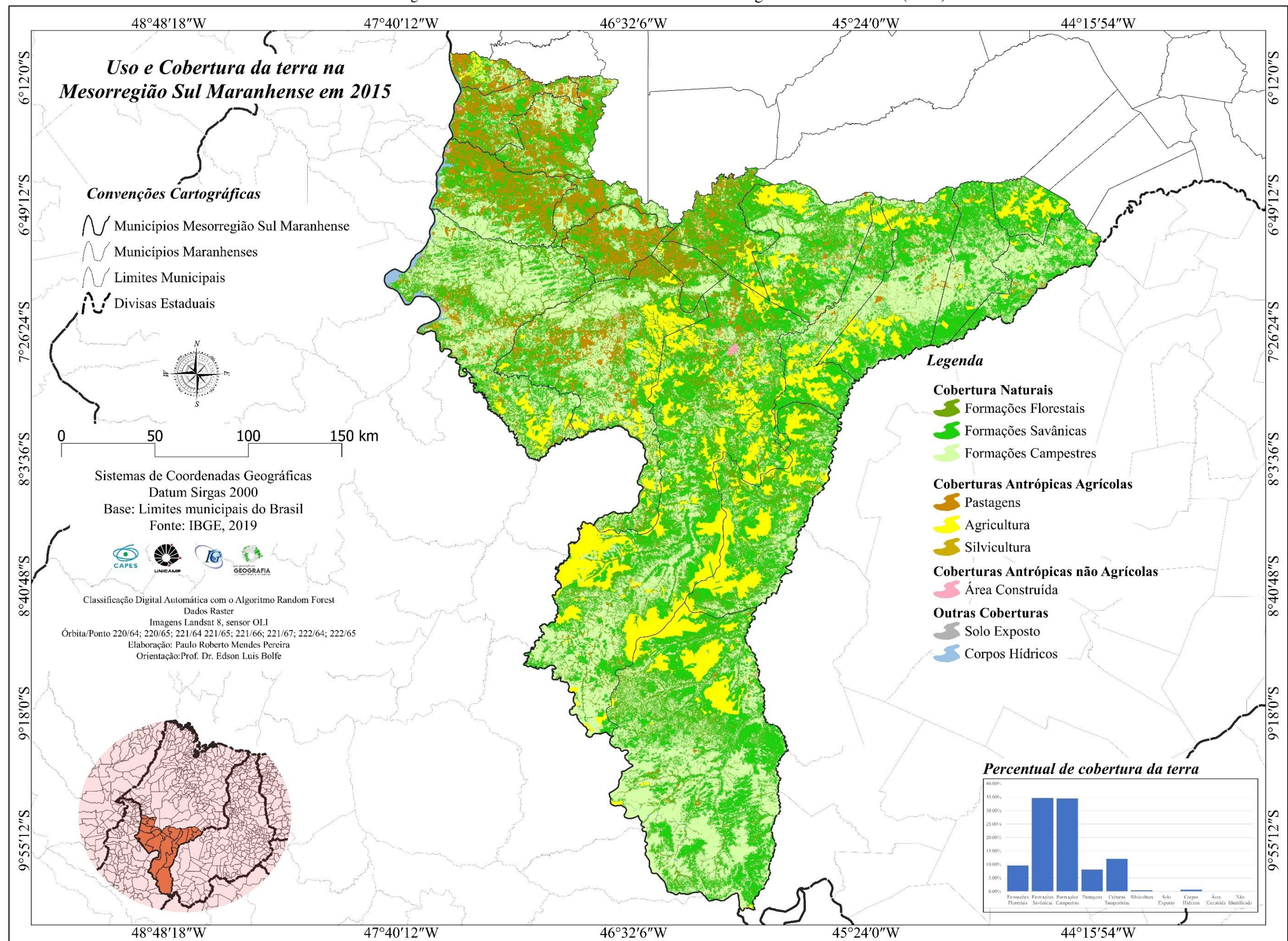
Fonte: dados de pesquisa (2021)

Figura 58 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2010)



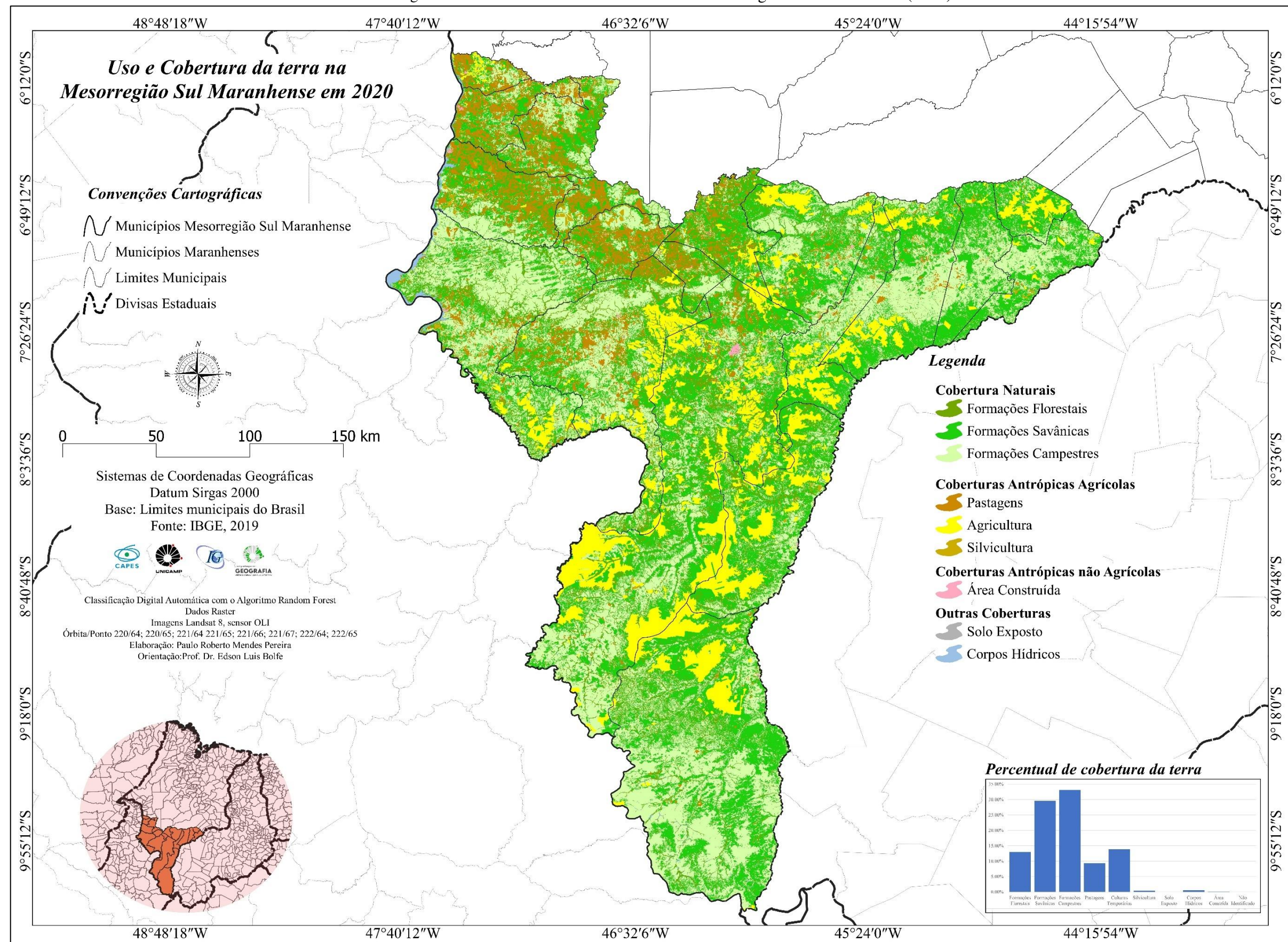
Fonte: dados de pesquisa (2021)

Figura 59 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2015)



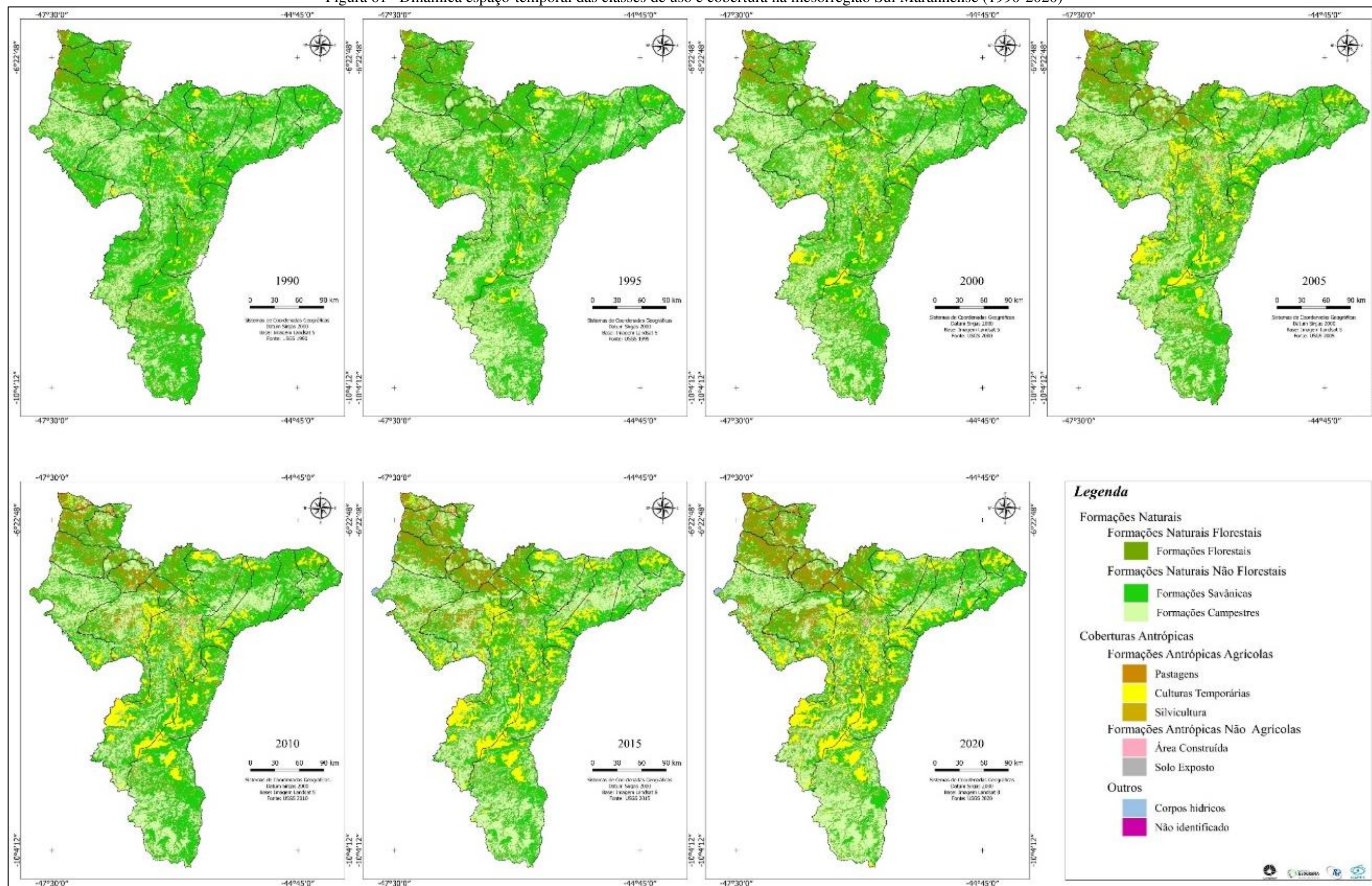
Fonte: dados de pesquisa (2021)

Figura 60 – Uso e cobertura e uso da terra na mesorregião Sul Maranhense (2020)



Fonte: dados de pesquisa (2021)

Figura 61– Dinâmica espaço-temporal das classes de uso e cobertura na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



Fonte: dados de pesquisa (2021)

A tabela 16 apresenta a superfície total mapeada em hectares e a frequência relativa de classes identificadas segundo os dados obtidos a partir da classificação automática e interpretação das imagens TM/Landsat 5 e OLI/Landsat 8, a partir do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest (Florestas Aleatórias) para os períodos analisados.

Tabela 16 - Uso e cobertura da terra na Mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)

Classe	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
	área (ha*)	área (ha*)	área (ha*)	área (ha*)	área (ha*)	área (ha*)	área (ha*)
Naturais	6.350,63	6.305,58	6.081,91	5.769,91	5.648,36	5.322,80	5.114,74
FF	577,74	622,44	870,53	908,89	818,82	646,81	880,07
FS	3.612,99	3.216,32	2.709,55	2.321,10	2.668,89	2.343,60	2.016,20
FC	2.159,90	2.466,82	2.501,82	2.539,93	2.160,64	2.332,39	2.218,47
Antrópico Agrícolas	367,77	428,40	653,07	966,29	1.083,64	1.392,97	1.604,02
PAS	147,39	168,22	247,95	377,95	420,76	545,61	633,97
AGR	220,38	260,18	405,12	587,80	657,43	820,85	939,82
SIL	0,00	0,00	0,00	0,54	5,45	26,51	30,23
Antrópico Não Agrícola	1,29	1,96	2,78	3,92	4,20	5,68	7,31
AC	1,29	1,96	2,78	3,92	4,20	5,68	7,31
Outros	33,35	31,97	24,63	25,14	27,79	42,79	37,49
SE	18,16	15,73	2,37	1,77	0,80	0,44	0,70
CH	15,18	16,24	22,26	23,37	26,99	42,35	36,79

*hectares x 1.000

FF- formações florestais; FS-formações savânicas; FC-formações campestres; PAS-pastagens; CT-culturas temporárias; SIL-silvicultura; AC-área construída; SE – solo exposto; CH – corpos hídricos;

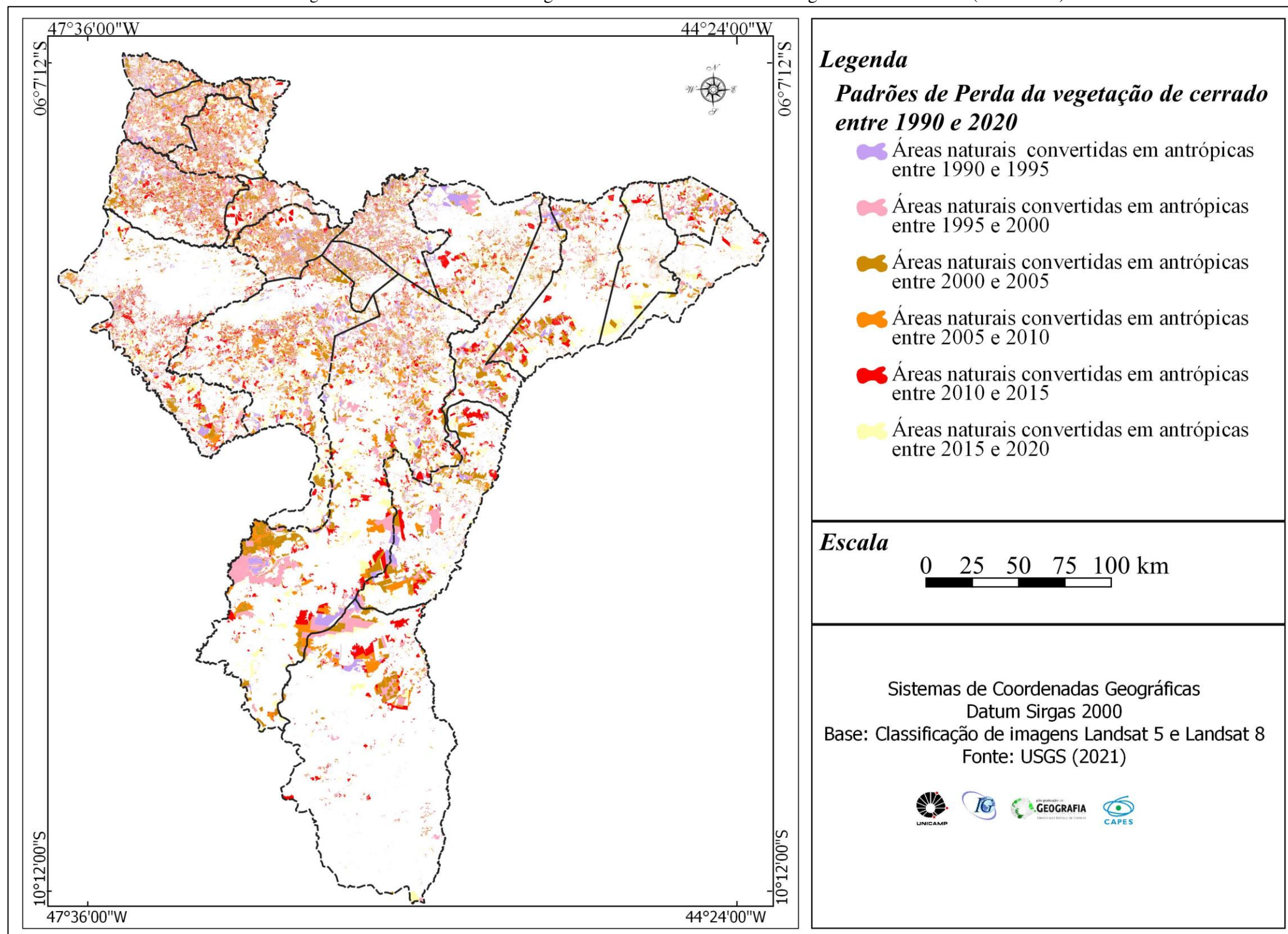
Fonte: dados de pesquisa, 2021

Como observado, no período analisado, a vegetação natural de cerrado – formações florestais, campestres e savânicas –, apesar de possuir maior taxa de cobertura da área, com taxas de 93,81% em 1990; 93,14% em 1995; 89,9,84% em 2000; 85,23% em 2005; 83,43% em 2010; 78,72% em 2015 e 75,55% em 2020, apresentou relativa perda de área, convertida principalmente em áreas agrícolas.

Em termos globais, entre 1990 e 2020, aproximadamente 1,23 Mha da vegetação natural de cerrado foi substituída por outras classes antrópicas, perda média em torno de 40.864,2 ha.ano⁻¹, ou uma taxa de conversão acumulada de 0,64% em 30 anos.

Na figura 62 são mostradas todas as áreas de vegetação natural de cerrado convertidas em áreas antrópicas, nas quais é possível observar predomínio na porção noroeste e central e maior persistência da vegetação nativa na porção nordeste e sul da mesorregião.

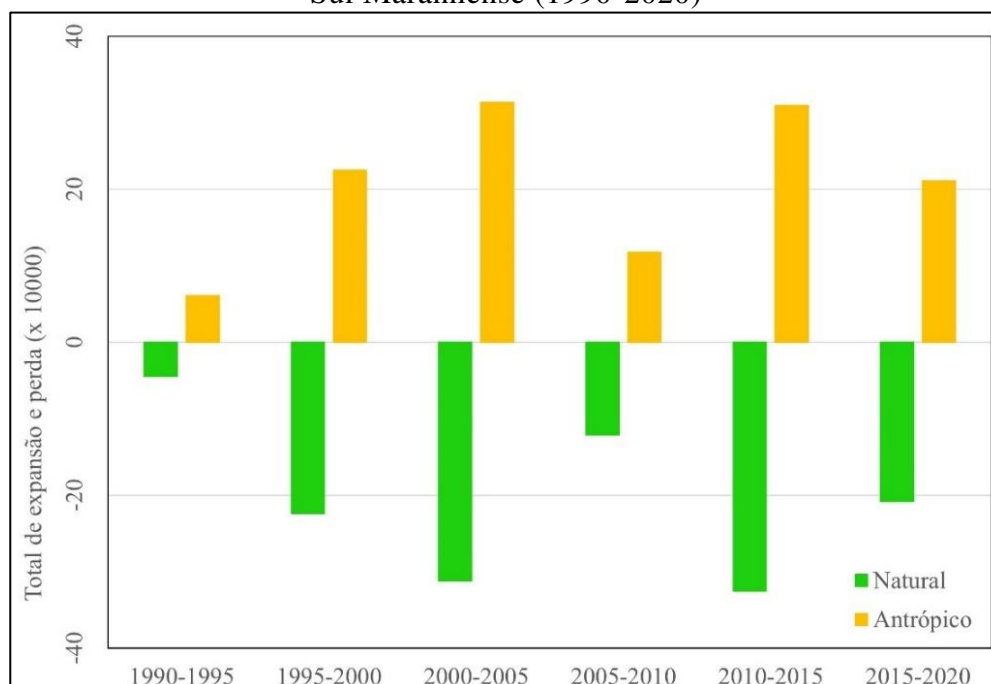
Figura 62 – Perda da cobertura vegetal natural de cerrado na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



Fonte: dados de pesquisa (2021)

Já a figura 63 aponta que o processo de degradação do cerrado é diretamente proporcional à expansão da agropecuária, porém o fenômeno não ocorre linearmente estável no período analisado, variando de acordo com o recorte temporal de análise, com relativa expansão a partir de 1995, e com picos entre os anos de 2010 e 2015.

Figura 63 – Dinâmica de perda de cobertura vegetal natural de cerrado na Mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



Fonte: dados de pesquisa, 2022

Entre 1990 e 1995, período que antecede a instalação de programas de expansão agrícola na área, por volta de 45 mil hectares de vegetação natural de Cerrado foram convertidos em classes antrópicas, correspondendo a 0,71% de conversão, um ritmo de desmatamento em torno de $9.009,31 \text{ ha.ano}^{-1}$.

Entre 1995 e 2000, esse processo é intensificado, sendo registrada uma área desmatada de cerca de 223 mil hectares, redução de 3,55% entre 1995 e 2000. Entre 2000 e 2005, aproximadamente 318 mil hectares de cerrado foram convertidos em outras classes, um aumento na taxa de desmatamento de 5,13% no período citado. A partir de 2005 é identificada uma pequena desaceleração no ritmo de desmatamento da área.

Dentre os fatores que influenciaram a redução, tem-se a finalização do PRODECER III em 2003 que resultou numa breve diminuição nas taxas de conversão da cobertura natural, identificando-se uma redução de 2,11%, duas vezes menor ao registrado no

recorte temporal anterior, ou seja, entre 2005 e 2010, 121 mil hectares de cerrado foram convertidos em outras classes.

Entre 2010 e 2015, o ritmo de desmatamento é novamente intensificado, registrando a maior taxa de conversão do Cerrado, e desmatando em torno de 325 mil hectares em cinco anos, uma perda de 5,76% no período citado. Entre 2015 e 2020, observa-se uma pequena desaceleração no ritmo do desmatamento na área, quando foram desmatados 208 mil hectares da vegetação natural, que representou 3,91%.

A intensa perda da cobertura vegetal natural de cerrado (formações florestais, savânicas e campestres) está diretamente associada à expansão da agropecuária (agricultura, pastagem e silvicultura), com aumento de área de mais de 336% entre 1990 e 2020, passando de 370 mil hectares para mais de 1,24 Mha, dos quais 57,97% de agricultura, 39,26% de pastagens e 2,28% de silvicultura.

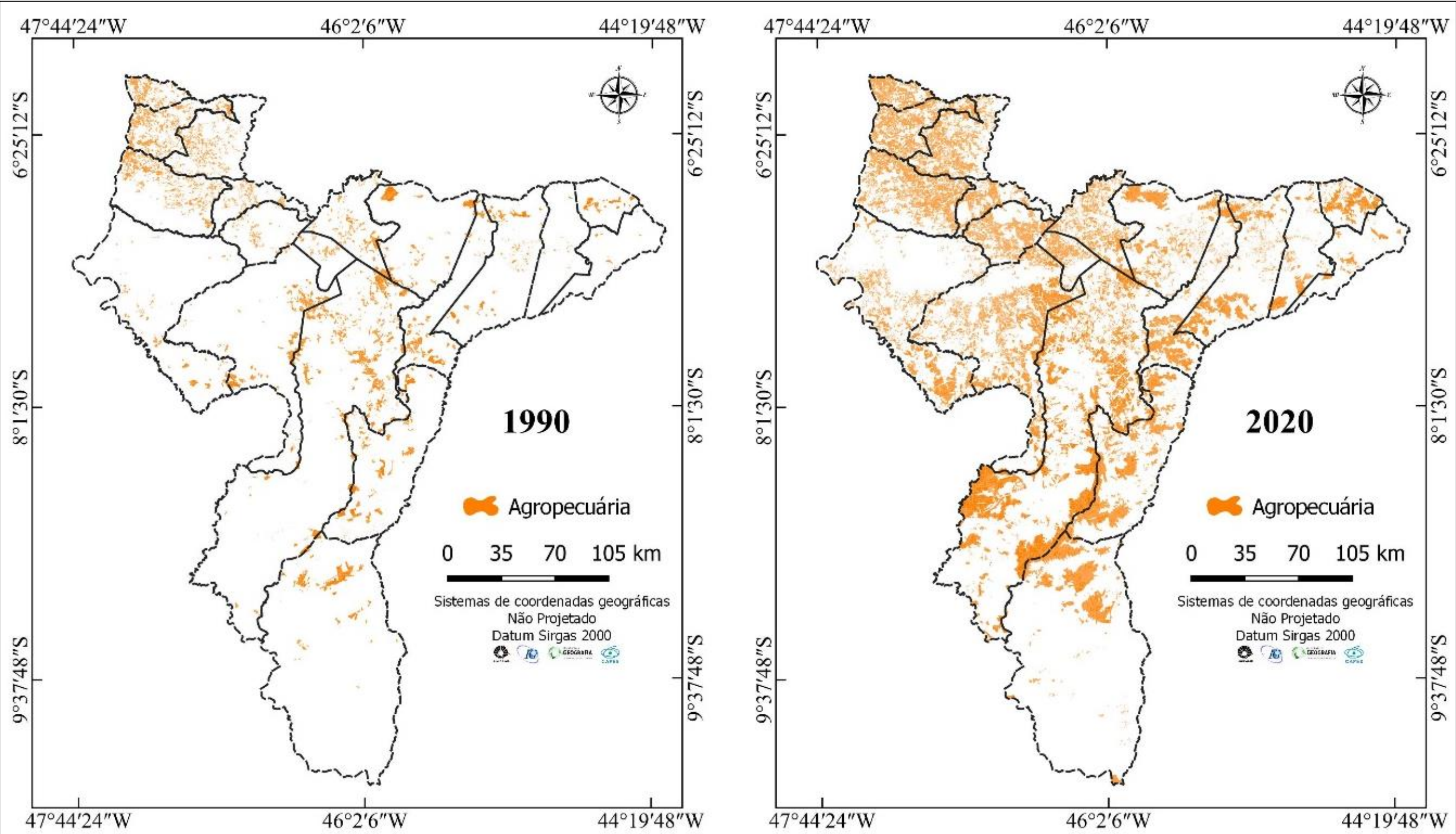
As maiores taxas de expansão foram registradas entre 1995 e 2005 e coincide justamente com o período de implementação e efetivação dos dois principais programas de expansão da agricultura na área – PRODECER III e PCEN –, fundamentais para as mudanças na estrutura produtiva, antes baseada no cultivo do arroz de sequeiro e predominantemente na pecuária extensiva, para o modelo de produção em larga escala de commodities agropecuários, onde se tem o predomínio da soja, pastagens e silvicultura, e que tem influenciado nos padrões de mudança de uso e cobertura da terra na área (Ferreira, 2008b).

Entre 1990 e 1995 (recorte temporal que antecede o PRODECER), identifica-se a menor taxa de expansão agrícola na área, quando foi registrado um aumento de 7% de novas áreas agrícolas; entre 1995 e 2000, a taxa de expansão foi de 52%, e entre 2000 e 2005 a taxa de expansão foi 48%. Nesse período foram identificadas as maiores proporções de crescimento que mostram como a criação e a implementação de políticas para a expansão agrícola influenciaram diretamente nas mudanças de uso e cobertura da terra.

Entre 2005 e 2010, observa-se uma desaceleração do processo de ampliação da agricultura na área, com taxa de expansão 4 vezes menor que as registradas no período de atuação dos projetos mencionados, com uma taxa de expansão de 12%, com novo crescimento entre 2010 e 2015 quando a taxa ficou entre os 28%, e nova redução entre 2015 e 2020, quando a expansão da agropecuária foi de 15%.

Na figura 64 é apresentada uma comparação espacial da agropecuária entre 1990 e 2020, na qual pode-se observar significativa mudança no padrão de distribuição espacial dessa classe no recorte temporal analisado.

Figura 64– Classes de uso agropecuário (agricultura, pastagem e silvicultura) na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



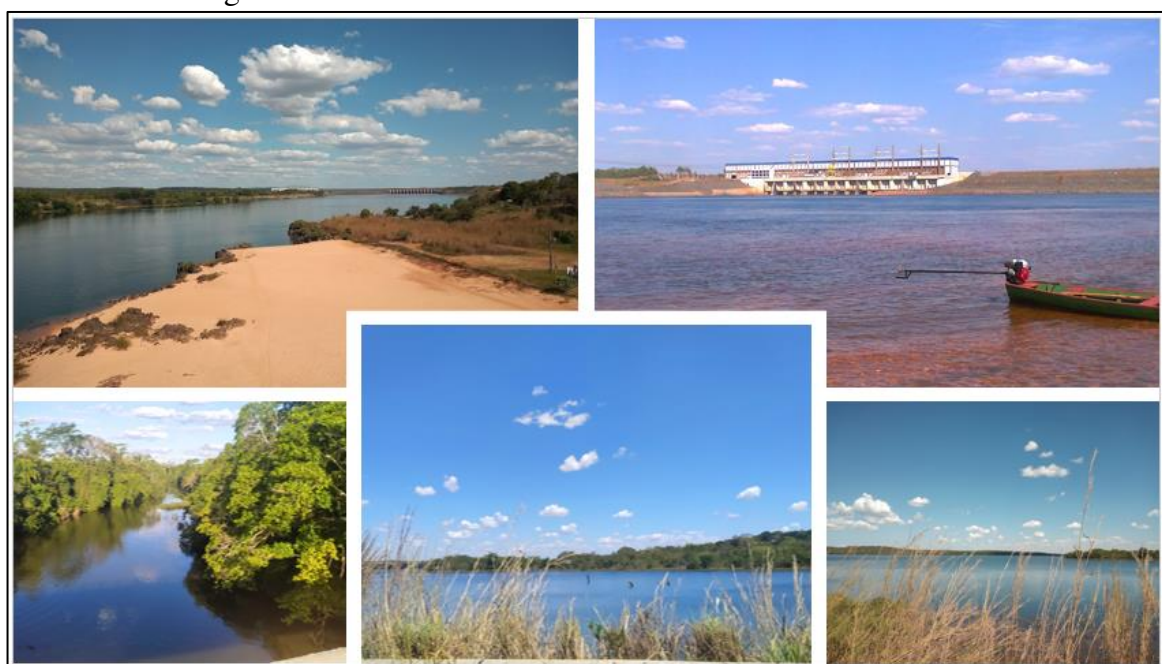
Fonte: dados de pesquisa (2021)

As coberturas antrópicas não agrícolas e outros tipos de cobertura corresponderam a menos de 1% da área mapeada em todos os recortes temporais analisados. As áreas construídas tiveram um incremento significativo no recorte temporal, com taxas de expansão de aproximadamente 465% entre 1990 e 2020, passando de 1.292 hectares para 7.308 hectares, superior a 14% ano, reflexo direto das mudanças nos padrões populacionais ocorridos nas últimas décadas, caracterizados pela expansão da urbanização em todo o estado do Maranhão (Burnett *et al.*, 2016).

Apesar de todos os municípios apresentarem aumento nas taxas de crescimento urbano, o município de Balsas merece destaque, tendo em vista que mais de 39% de toda a área construída identificada corresponde à sede municipal do município. Fator como a presença de uma infraestrutura consolidada para absorver a atividade do agronegócio favoreceu a expansão da área construída, e tem ocasionado nos últimos anos significativa expansão urbana no município de Balsas.

Já os corpos hídricos apresentaram expansão em torno de 161,91%, passando de 16 mil hectares no ano de 1990, para mais de 36 mil hectares no ano de 2020, um crescimento de área de mais de 24% em 30 anos. A expressiva expansão dessa classe é associada à criação da Usina Hidrelétrica de Estreito, localizada no Rio Tocantins (figura 65), com obra iniciada em 2012 e inaugurada em 2015. O barramento e a consequente criação do lago artificial ocasionaram um aumento significativo da classe corpos hídricos na área, principalmente sobre as formações florestais, expandindo 22%, seguido de formações campestres e pastagens com 12% e 9%, respectivamente.

Figura 65 – Hidrelétrica no rio Tocantins em Estreito -MA



Fonte: dados de pesquisa, 21 de fevereiro 2023

5.2.1 Transições espaciais

Apresenta-se aqui a análise das principais transições espaciais ocorridas entre 1990 e 2020, por considerar uma importante informação para o entendimento da dinâmica de uso e cobertura da terra na área. Serão apresentadas apenas as mudanças entre as classes referentes às coberturas naturais de cerrado (formações florestais, savânicas e campestres) e agropecuária (pastagens, agricultura e silvicultura), não sendo analisadas as taxas de mudanças entre as classes antrópicas não agrícolas e outros tipos de cobertura. A escolha de tais classes para as análises ocorreu pela presença na área (tabela 17) e por corresponder às principais transições entre as classes na área com taxas de conversão superiores a 3%.

Tabela 17 - Percentual por classe para a mesorregião Sul Maranhense (1990 -2020)

Classe	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
FF	8,53%	9,19%	12,86%	13,43%	12,10%	9,55%	13,00%
FS	53,37%	47,51%	40,02%	34,29%	39,42%	34,62%	29,78%
FC	31,90%	36,44%	36,96%	37,52%	31,92%	34,45%	32,77%
PAS	2,18%	2,48%	3,66%	5,58%	6,22%	8,06%	9,36%
AGR	3,26%	3,84%	5,98%	8,68%	9,71%	12,13%	13,88%
SIL	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,08%	0,39%	0,45%
AC	0,02%	0,03%	0,04%	0,06%	0,06%	0,08%	0,11%
SE	0,27%	0,23%	0,03%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%
CH	0,22%	0,24%	0,33%	0,35%	0,40%	0,63%	0,54%

Fonte: dados de pesquisa, 2021

Com exceção dos mapeamentos realizados em 2005 e 2020⁹⁸, as formações savânicas apresentaram maiores taxas de cobertura da terra, seguidas pelas formações campestres (foi a maior classe em área nos anos de 2005 e 2020), em terceiro pelas formações florestais, em quarto lugar a classe agricultura, em quinto lugar as pastagens, em sexto lugar os corpos hídricos, em sétimo a silvicultura (reflorestamento) e, em menor proporção, as classes áreas construídas e solo exposto.

A tabela 18 e figuras 66 e 67 mostram as mudanças líquidas de 1990 e 2020 entre as classes, nas quais pode-se identificar a expansão das classes antrópicas e redução das formações savânicas, classe que apresentou maior taxa de conversão no período de análise.

⁹⁸ Nos mapeamentos referentes aos anos de 2005 e 2020, as formações campestres apresentaram a maior taxa de cobertura da terra na área, esse fator pode estar associado à expansão das atividades agrícolas sobre as formações savânicas, que alterou as taxas de cobertura da terra para as formações savânicas, ou mesmo por características radiométricas das imagens para esses anos, que ocasionou significativa confusão entre as classes savânicas e campestres.

Tabela 18 - Mudanças líquidas na mesorregião Sul Maranhense (1990 e 2020)

*	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020
FF	44.697,24	248.097,96	38.357,37	-90.068,40	-172.011,42	233.257,68
FS	-396.664,65	-506.770,47	-388.456,02	347.797,35	-325.293,75	-327.396,33
FC	306.920,88	34.998,75	38.106,09	-379.283,13	171.745,92	-113.918,58
PAS	20.833,74	79.726,05	130.000,23	42.812,91	124.848,00	88.357,77
AGR	39.794,49	144.945,09	182.672,37	69.631,92	163.422,90	118.966,32
SIL	0,00	0,00	540,27	4.908,51	21.064,59	3.720,15
AC	665,91	820,44	1.139,58	278,64	1.486,71	1.624,68
SE	-2.429,82	-13.367,52	-595,98	-973,62	-358,83	257,94
CH	1.058,04	6.024,06	1.102,14	3.626,46	15.359,94	-5.560,02

*área em hectares

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Figura 66 – Perdas e ganhos na mesorregião Sul Maranhã (1990 e 2020)



Fonte: dados de pesquisa, 2022

Figura 67 – Mudanças entre as classes antrópicas não agrícolas na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



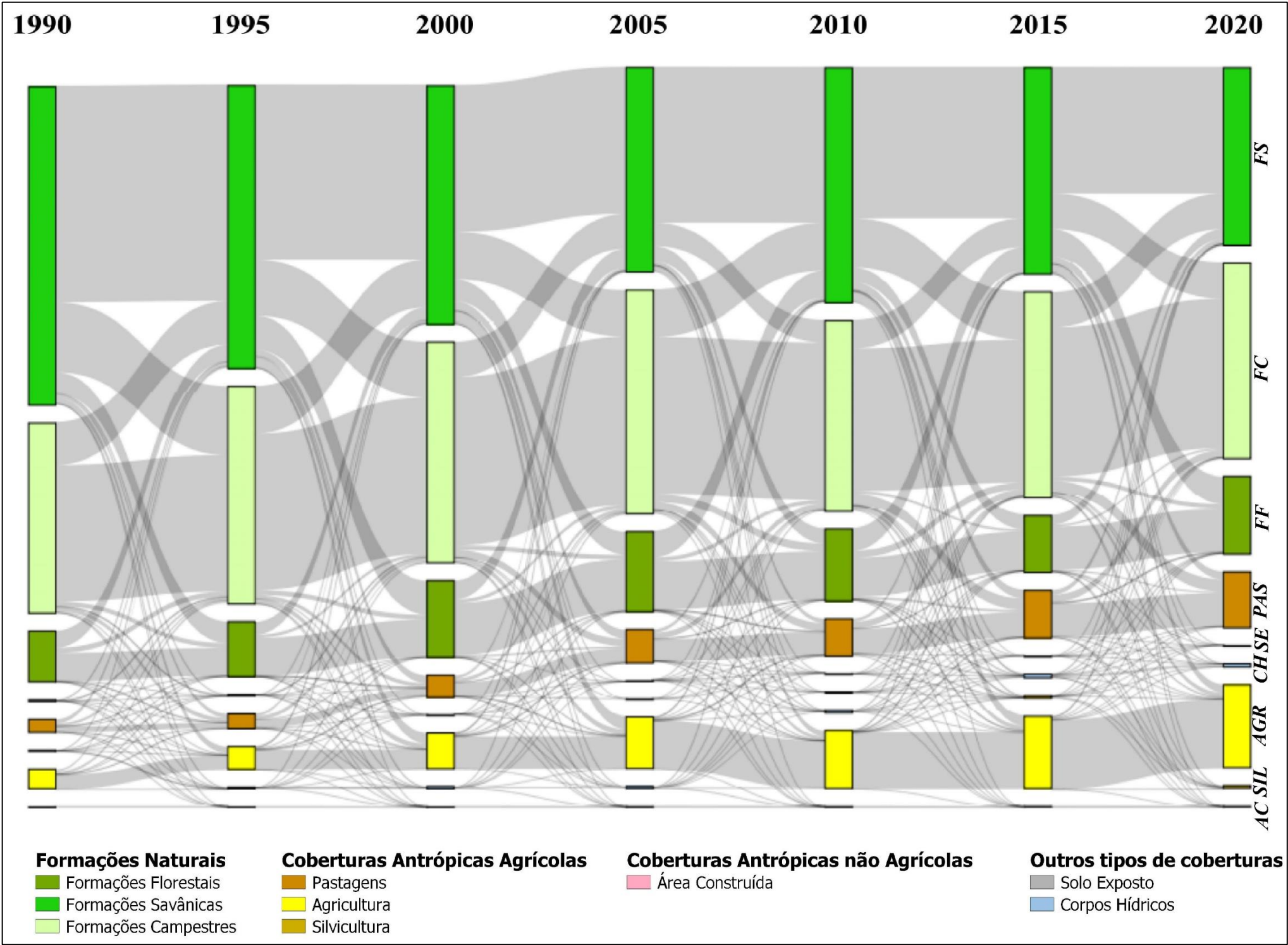
Fonte: dados de pesquisa, 2022

O padrão de transição espacial é apresentado no diagrama de Sankey (figura 68) elaborado com base na agregação da matriz geográfica de Berry, obtida a partir de tabulação cruzada entre os mapas de uso e cobertura da terra para a área, e ilustra os principais processos ocorridos na mesorregião Sul Maranhense.

Entre 1990 e 2020, houve mudanças principalmente em termos de quantidade (aumento ou redução da superfície de algumas classes) e mudança de distribuição espacial, tendo como principais processos a pertinência (manutenção de uma classe sem mudança de espacial), seguida pelos processos de modificação (mudança de um tipo de classe a outro, sendo esses tipos de mudanças possíveis, a exemplo das formações florestais sobre formações savânicas ou campestres em savânicas, indicando mudança no padrão fisionômico, mas sem necessariamente mudar o nível superior da classe).

O processo de conversão onde ocorre a mudança de uma classe de vegetação natural (formações florestais, savânicas e campestres) para uma classe antrópica (agricultura, pastagens, silvicultura, área construída etc.); e deslocamento que representa uma condição de mudança entre pelo menos 3 classes, onde não existe modificação, indicando algum nível de confusão entre classes, por exemplo: solo exposto, agricultura e campos, que podem estar associados à semelhança espectral que as classes apresentam.

Figura 68 – Sankey para as transições de uso e cobertura da terra



Fonte: dados de pesquisa, fev. 2023

Entre 1990 e 2020, 73,49% de toda conversão de cerrado ocorreu em formações savânicas, 22,82% em formações campestres e 3,69% em formações florestais. Com exceção da análise de 2005-2010 quando 56% de todo o desmatamento foi identificado em formações campestres, as formações savânicas lideraram as taxas de perda de área em todos os recortes temporais analisados (tabela 19), já as menores taxas de conversão foram identificadas em formações florestais, não ultrapassando os 6%, exceto entre os anos de 2005 e 2015 quando a taxa de conversão das formações florestais foi próxima dos 10%.

Tabela 19 - Percentual de perda por estratos de vegetação natural de cerrado na Mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)

	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020
FF	3.89%	5.05%	5.69%	8.60%	9.32%	2.93%
FS	84.40%	77.98%	65.18%	34.77%	55.68%	55.61%
FC	11.71%	16.97%	29.14%	56.62%	35.00%	41.45%

FF- formações florestais; FS-formações savânicas; FC-formações campestres

Fonte: dados de pesquisa, 2021

A distribuição espacial das áreas de vegetação de cerrado convertidas é apresentada na figura 69. Observa-se que o processo de perda das formações florestais predominou na porção noroeste da área (municípios da microrregião de Porto Franco), uma região tipicamente de contato com o bioma amazônico. Já o desmatamento em formações savânicas e campestres (tabela 20) apresentou padrão espacialmente distribuído por toda a área, concentrando grandes desmatamentos (>10 hectares), em Balsas, Tasso Fragoso, Riachão, São Raimundo das Mangabeiras e sul de Carolina⁹⁹.

Tabela 20 - O total de polígonos de desmatamentos identificados na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)

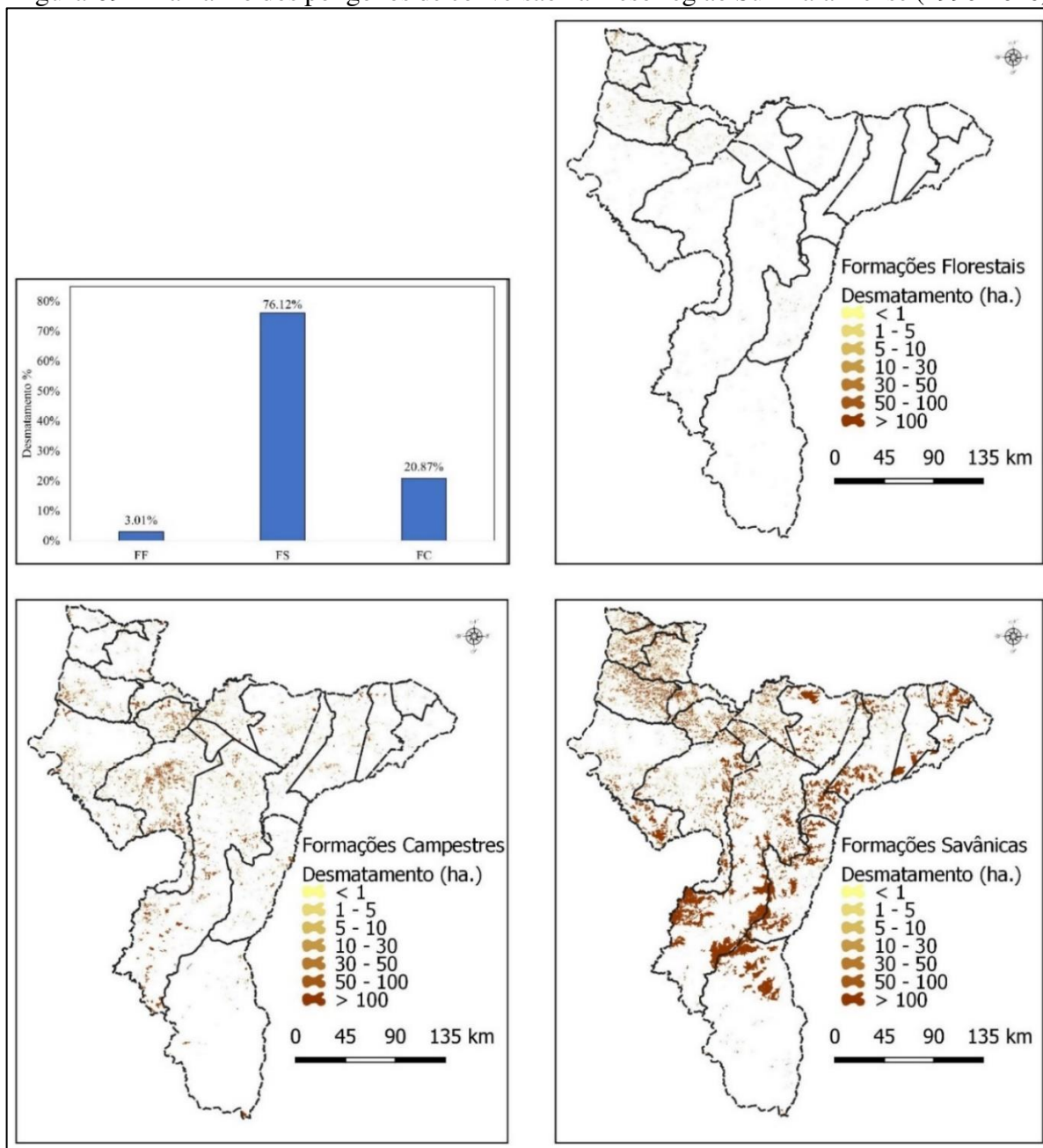
Área hectares	Número de polígonos de desmatamento		
	FF	FS	FC
< 1	16554	38345	20127
1 a 5	5025	13675	12612
5 a 10	1055	3456	3173
10 a 30	809	3241	2705
30 a 50	107	808	639
50 a 100	71	768	490
> 100	33	996	443
total	23654	61289	40189

FF – Formações Florestais; FS – Formações Savânicas; FC – Formações Campestres

Fonte: dados de pesquisa, 2021

⁹⁹ Fator relacionado à inserção de práticas agrícolas modernas para a introdução de monocultivos.

Figura 69 – Tamanho dos polígonos de conversão na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



Fonte: dados de pesquisa (2022)

Apesar das perdas, no geral, as formações florestais apresentaram um aumento de aproximadamente 52% em 30 anos, passando de $\cong 576$ mil hectares em 1990 para $\cong 879$ em 2020. Considerando a dinâmica de transição dessa classe, entre 1990 e 2020, as formações florestais obtiveram uma pertinência de 58% ($\cong 336$ mil hectares de formações florestais que não mudaram de condição entre 1990 e 2020); uma taxa real de ganho de 52% ($\cong 302$ mil hectares), dos quais 81% ($\cong 281$ mil hectares) foram sobre formações savânicas e 18% ($\cong 63$ mil hectares) sobre as formações campestres.

Tal fenômeno pode ser associado a processos de regeneração florestal, ou mesmo erros associados à classificação digital, foi registrado $\cong 7\%$ de conversão das formações florestais em classes antrópicas – $\cong 45$ mil hectares de florestas deram lugar a classes antrópicas –, dos quais $\cong 37$ mil hectares (81% de toda a conversão dessa classe).

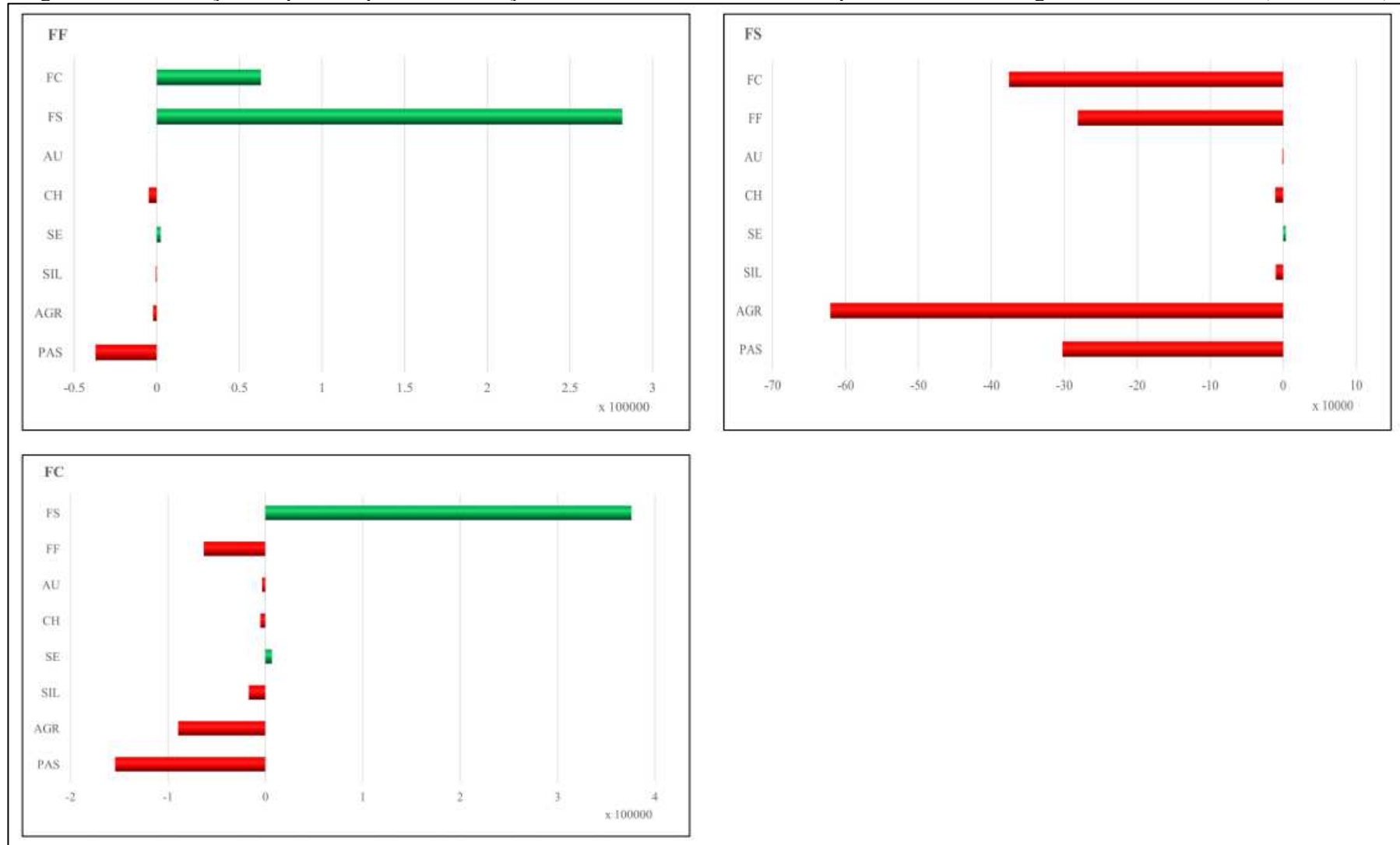
As formações savânicas, como já mencionado, apresentaram a maior taxa de conversão na área. Entre 1990 e 2020 foi registrada uma redução em torno de 44%, passando de 3,6 Mha. em 1990 para 2,0 Mha. em 2020, ou seja, em 30 anos $\cong 1.6$ Mha. de savanas foram convertidas em outras classes. A principal perda das formações savânicas foram para a agricultura ($\cong 17,1\%$) e para pastagens ($\cong 8,3\%$).

No geral, entre 1990 e 2020, mais de 620 mil hectares de Savanas foram convertidos em agricultura e quase 300 mil hectares em pastagens. Destaca-se também significativa proporção de formações savânicas modificadas em formações florestais e formações campestres, com taxa de 10% e 7% em 30 anos, fatores como abertura de novas áreas para a agropecuária, e/ou recomposição florestal, podem estar relacionados a esses fenômenos.

As formações campestres apresentaram um pequeno aumento de área em 30 anos, passando de 2,15 Mha. em 1990 para 2,20 Mha. em 2020, um aumento de cerca de 50 mil hectares. Quanto ao padrão de transição, essa classe apresentou maior ganho em relação à perda, expandindo sobre as áreas de formações savânicas em torno de 350 mil hectares ($\cong 17\%$). Já as principais conversões dessas classes foram para as pastagens, uma área de cerca de 154 mil hectares ($\cong 7\%$) e para a agricultura uma área de 89 mil hectares (4%), e para as formações florestais uma área de 63 mil hectares ($\cong 3\%$).

A figura 70 mostra a dinâmica de transições que ocorreu entre as classes formações florestais, savânicas e campestres, no recorte temporal de 1990 a 2020, na qual pode-se identificar que as formações savânicas apresentaram a maior contribuição para a expansão de áreas agrícolas, quando comparadas com as outras classes. As formações campestres tiveram maior participação para a expansão das florestas plantadas (silvicultura).

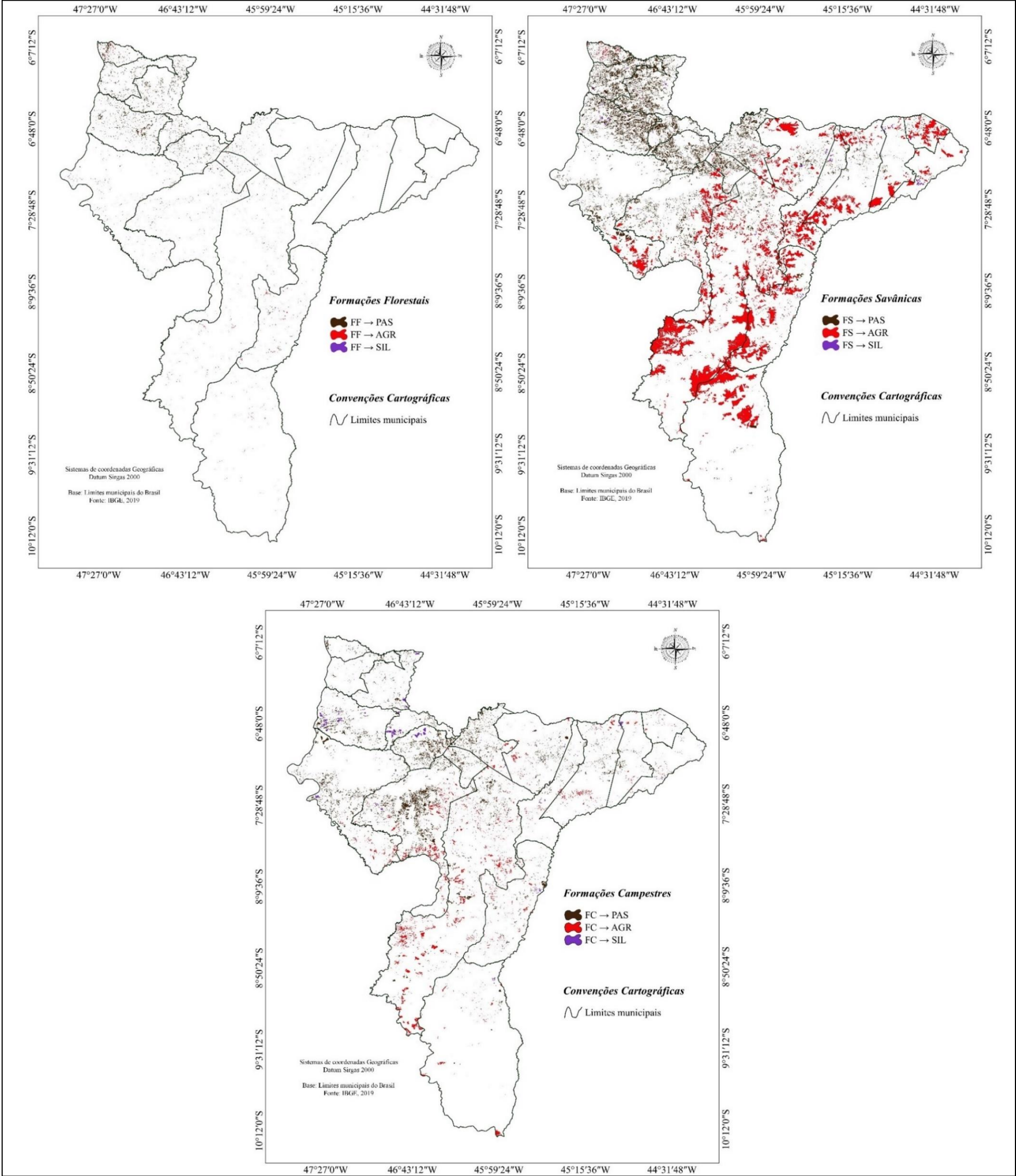
Figura 70 – Transições espaciais para as formações florestais, savânicas e campestres na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



Fonte: dados de pesquisa, 2022

Quanto à distribuição espacial (figura 71), pode-se diferenciar uma distribuição espacialmente concentrada das áreas de savanas que mudaram para pastagens, predominando na porção noroeste da área, enquanto a conversão para a agricultura concentrou-se na porção central e nordeste da mesorregião, o que pode ser explicado pelas características pedo-geomorfológicas, pela presença de terrenos planos e de solos profundos, o que beneficia a expansão da agricultura mecanizada; por outro lado, a porção noroeste apresenta um relevo mais acidentado, com declives suaves e solos mal drenados, o que impede a mecanização, sendo uma barreira para o desenvolvimento de uma agricultura moderna na área.

Figura 71 – conversão da vegetação natural de cerrado em agropecuária na mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)



Fonte: dados de pesquisa (2022)

Ao analisar os dados de expansão da agricultura, foi registrado um incremento de área de mais de 326% em 30 anos¹⁰⁰, passando de 220 mil hectares (3,26% do total mapeado) no ano de 1990 para 939 mil hectares (13% da área) no ano de 2020, um crescimento de mais 719 mil hectares, ou uma taxa média de expansão de 23.910 ha/ano¹ (7,49% ao ano). Grande parte dessas áreas foi inserida sobre remanescentes de vegetação natural, com destaque para as formações savânicas que perderam uma área de $\cong$ 620 mil hectares, correspondendo a 86% de toda a expansão da agricultura no recorte temporal analisado, pouco mais de 89 mil hectares foram oriundos das formações campestres, e pouco mais de 5 mil hectares sobre pastagens.

Cabe destacar que esse processo não ocorreu linearmente estável, apresentando ciclos de expansão e redução. Entre 1990 e 1995, a taxa de expansão da agricultura superou os 17%, a partir de 1995 é registrada aceleração no ritmo de expansão da agricultura na área, quando a taxa de expansão superou os 55% entre 1995 e 2000, e 44% entre 2000 e 2005 (período de maior dinâmica agrícola da área).

É a partir de 2005 que ocorre a desaceleração nas taxas de expansão da agricultura na área, com aumento de apenas 11% de novas áreas agrícolas entre 2005 e 2020, e um ligeiro aumento entre 2010 e 2015 quando se identificou taxa de expansão de 24%. Entre 2015 e 2020, ocorre redução na velocidade de expansão da agricultura na área, registrando-se um aumento de 14% de novas áreas destinadas ao cultivo de alguma cultura agrícola.

As pastagens¹⁰¹ apresentaram um padrão temporal semelhante aos observados para a agricultura. Em 30 anos ocorreu uma taxa de expansão superior a 230%, passando de aproximadamente 147 mil hectares (2,5% da área mapeada) em 1990 para 633 mil hectares em 2020 (9,35 da área), um ganho de mais de 485 mil hectares em 30 anos.

No geral, observou-se um aumento em torno de 48 mil hectares de pastagens plantadas, ou 16.193 ha/ano⁻¹. Assim como na classe agricultura, cerca de 92% das novas áreas de pastagens ocorreram em substituição das formações savânicas e campestres, precisamente, dos 495 mil hectares de áreas de pastagens, 302 mil hectares ocorreram sobre

¹⁰⁰ Em 1990 a classe agricultura predominou na porção central e sul da área, microrregião Gerais de Balsas que foi responsável por mais de 81% de toda área agrícola mapeada em 1990. Os municípios de Balsas (33,19%), Tasso Fragoso (19,74%), Alto Parnaíba (16,16%) e Riachão (12,32%) apresentaram as maiores taxas para essa classe. No mapeamento de 2020, observa-se uma mudança do padrão de distribuição espacial da classe agricultura, apesar de ainda predominar nos municípios que compõem a microrregião Gerais de Balsas (69% de toda área agrícola mapeada em 2020), sendo Balsas (35%) Tasso Fragoso (12%) e Alto Parnaíba (11%) onde se concentra grande parte das áreas agrícolas. Tem-se um direcionamento para os municípios de Porto Franco e Carolina que registraram respectivamente 9,79% e 3,43% do total da classe agricultura identificada em 2020.

¹⁰¹ As pastagens apresentaram um padrão espacial de distribuição concentrando-se principalmente na porção noroestes da área, onde se destacam os municípios de Estreito (15%), Riachão (13%), São João do Paraíso (11), Porto Franco (10%).

savanas e 154 mil hectares sobre formações campestres, como já mencionado, grande parte dessas áreas concentra-se na porção noroeste da mesorregião.

Entre 1990 e 1995, as pastagens apresentaram aumento de 14%; entre 1995 e 2000, a taxa de expansão supera os 47%, e esse aumento é observado também entre 2000 e 2005 quando se identificou aumento de mais de 54%. A partir de 2005 observa-se retração nos ritmos de expansão das pastagens na área, registrando cerca de 9,95% de novas áreas entre 2005 e 2010, 29% entre 2010 e 2015 e 15% entre 2015 e 2020.

Já a silvicultura, apesar de apresentar pouca representatividade quando comparada ao limite territorial da área (próximo a 0,42% de toda área mapeada no ano de 2020), apresentou um crescimento relativamente significativo de mais de 6.000%, passando de 447 hectares no mapeamento do ano 2005¹⁰² para mais de 28 mil hectares no ano de 2020, que correspondeu a um incremento de mais de 1.389 ha/ano.

Entre 2005 e 2010, registra-se a maior taxa de expansão dessa classe, com incremento de área de mais de 420%; a partir de 2010, a taxa de expansão foi de 133%; de 2010 a 2015, a taxa de expansão superou os 371%; entre 2015 e 2020, observa-se significativa redução das taxas de expansão da silvicultura na área, quando se registrou aumento de pouco mais de 9%.

Conforme Oliveira, Pereira e Araujo (2019), a introdução da silvicultura no Maranhão tem relação direta com a inserção do projeto Grande Carajás, com o objetivo de alimentar o complexo siderúrgico produtor de ferro-gusa de Açailândia, e foi uma alternativa à redução de matéria prima natural, que formou as bases para a implantação de uma rede de produção que apresentou crescimento substancial no período de análise, passando dos 130%.

5.2.2 Dinâmica por município

Apesar de intenso, o processo de conversão do cerrado é distribuído de forma desigual quando analisado por municípios. Conforme observado na tabela 21, entre os 19 municípios¹⁰³ que integram a mesorregião sul, Balsas¹⁰⁴ concentrou a maior taxa de conversão da vegetação de cerrado no recorte temporal analisado (1990-2020), concentrando 23,57% de toda área convertida, seguido pelos municípios de Riachão (11,73%), Tasso Fragoso (7,63%),

¹⁰² Entre 1990 e 1995 não se identificou áreas destinadas à inserção dessa atividade econômica na área, sendo os primeiros registros a partir dos anos 2000.

¹⁰³ Somados, os seis municípios que apresentaram maior taxa de conversão da cobertura vegetal concentraram mais de 16% de toda a área desmatada entre 1990 e 2020 na região.

¹⁰⁴ A taxa de perda de cobertura vegetal de Balsas, a partir da abordagem metodológica elaborada nesta pesquisa, é inferior à quantidade de área desmatada identificada nos dados Prodes Cerrado INPE (2023), porém as diferenças metodológicas não possibilitam a comparação direta dos dados do Prodes com os encontrados neste estudo.

Alto Parnaíba (6,71%), Estreito (6,27) e Carolina (6,12%). Já as menores taxas de desmatamento foram registradas nos municípios de Benedito Leite (0,9%), Campestre do Maranhão (1,46%), Nova Colinas (1,58%) e São Feliz de Balsas (1,83%).

Tabela 21 -Acumulado de perda da cobertura vegetal de cerrado por municípios que compõem a mesorregião Sul Maranhense (1990-2020)

Município/ano	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020
	ha.	ha.	ha.	ha.	ha.	ha.
Alto Parnaíba	6.723,63	27.104,4	21.037,5	19.884,78	28.143,00	15.647,67
Balsas	39.922,74	87.670,62	81.666,9	71.868,24	74.082,15	67.787,64
Benedito Leite	499,59	2.427,57	3.757,59	2.853,81	4.526,64	7.416,09
Campestre do Maranhão	6.805,71	8.968,5	8.351,37	7.612,2	4.708,44	5.450,49
Carolina	13.413,24	11.840,67	23.342,67	14.685,57	44.136,72	34.912,08
Estreito	14.641,47	23.873,13	35.706,6	8996,04	43.872,75	25.166,25
Feira Nova do Maranhão	12.519,18	10.483,74	21.905,37	18.171,00	18.475,83	14.769,72
Fortaleza dos Nogueiras	12.591,72	13.659,48	21.970,8	4.741,47	19.989,00	19.157,40
Loreto	52.29,45	9.904,95	24.104,7	2.662,74	24.328,89	17.686,98
Nova Colinas	5047,56	5.984,01	10.853,91	2.488,14	6.293,16	8.042,13
Porto Franco	10.081,98	23.123,34	16.164,36	14.196,42	16.741,08	18.683,28
Riachão	25.829,37	21.233,79	41.744,79	37.049,22	47.527,65	57.573,81
Sambaíba	7.390,17	10.256,4	19.833,21	5.171,04	15.784,29	13.326,75
São Domingos do Azeitão	3.170,16	7.639,02	10.258,56	714,87	8.338,77	5.008,50
São Félix de Balsas	43,56	1.914,66	5.080,95	1.321,92	6.581,16	18.127,98
São João do Paraíso	8.699,67	19.865,25	22.524,12	18.878,67	27.210,87	24.898,68
São Pedro dos Crentes	3.668,22	9.807,93	11.933,1	4.764,42	13.632,39	8.200,98
São Raimundo. das Mangabeiras	14.017,77	13.174,11	19.053,45	3.445,47	20.867,49	15.524,73
Tasso Fragoso	13.126,32	17.364,6	31.052,07	19.844,46	24.968,79	19.531,89

Fonte: dados de pesquisa (2021)

Cabe destacar que, apesar de liderarem as taxas de supressão da vegetação natural de cerrado entre 1990 e 2020, os municípios de Balsas, Riachão, Tasso Fragoso, Alto Parnaíba, Estreito e Carolina concentraram o maior percentual de área de vegetação nativa de cerrado preservada em 2020.

Esse fator está associado principalmente ao tamanho de suas áreas territoriais, considerando que, em geral, tais municípios somados correspondem a mais de 75% de todo o

território da área de estudo, sendo Balsas, com mais de 16 mil km², o maior município da área e tem atualmente 28% de sua área antropizada (tabela 22).

Tabela 22 - Taxa de cobertura natural e antrópica em 2020

Municípios	Natural %	Antrópico %	Outros %
Alto Parnaíba	90,17%	9,62%	0,21%
Balsas	71,25%	28,47%	0,28%
Benedito Leite	91,85%	7,02%	1,13%
Campestre do Maranhão*	44,69%	52,89%	2,42%
Carolina	83,88%	13,45%	2,67%
Estreito*	58,61%	39,22%	2,16%
Feira Nova do Maranhão	60,56%	39,37%	0,07%
Fortaleza dos Nogueiras	67,54%	32,42%	0,04%
Loreto	80,12%	19,68%	0,20%
Nova Colinas*	66,97%	32,97%	0,06%
Porto Franco	51,24%	47,73%	1,03%
Riachão	71,92%	27,83%	0,25%
Sambaíba	72,82%	26,74%	0,44%
São Domingos do Azeitão	64,97%	34,93%	0,09%
São Félix de Balsas	87,89%	11,94%	0,17%
São João do Paraíso	64,45%	35,41%	0,14%
São Pedro dos Crentes	64,76%	34,97%	0,27%
São Raimundo das Mangabeiras	80,16%	19,70%	0,15%
Tasso Fragoso	70,65%	29,06%	0,29%

*municípios com a taxa de cobertura vegetal natural de cerrado inferior ao de área antropizada (1990-202)

Fonte: dados de pesquisa (2021)

Os municípios que apresentaram menor taxa de cobertura vegetal em relação ao tamanho de área foram: Campestre do Maranhão (52%), Porto Franco (47%), Feira Nova do Maranhão (39%), Estreito (39%), São João do Paraíso (35%), São Pedro dos Crentes (34%) e São Domingos do Azeitão (34%), todos com taxa de antropização superior a 30% de seu limite territorial no ano de 2020. Grande parte dessa conversão é associada à presença de pastagens, principal vetor de mudança identificado em atividade de campo nessas áreas.

5.3 Modelagem de uso e cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense

Nesta seção serão apresentados os resultados do processo de modelagem e simulação da perda de cobertura vegetal em decorrência da expansão da agropecuária, utilizando o método de pesos e evidências em plataforma de modelagem espacial Dinâmica Ego (Soares-Filho, Cerqueira, Pennachin, 2002), e tem como objetivo construir cenários de tendências da expansão agrícola para a mesorregião Sul Maranhense.

O modelo de simulação foi construído segundo padrão espacial estacionário, uniforme, seguindo tendências de expansão atual (2015-2020) e levou em consideração que as transições analisadas se manterão constantes sem levar em conta o processo de regeneração florestal, pois neste recorte foram trabalhadas apenas as perdas da cobertura florestal (transições floresta → pastagens, savanas → pastagens, campos → pastagens, floresta → agricultura, savanas → agricultura, campos → agricultura, floresta → silvicultura, savanas → silvicultura e campos → silvicultura).

A referência temporal dos dados são os anos de 2015 (inicial) e 2020 (final), haja vista que todo o padrão de análise dos dados seguiu recortes temporais de 5 anos. Pontua-se que a escolha desse recorte seguiu preceitos descritos em Arcoverde (2014) em razão de considerar que, em processos de modelagem de cenários de uso e cobertura da terra, a tendência que mais se aproxima da realidade, quando se pretende simular transições em uso e cobertura, é a que tem como referência o recorte temporal mais recente.

Desse modo, conforme a metodologia descrita no capítulo 3, os resultados descritos abarcarão inicialmente a análise da matriz de transição entre 2015 e 2020 para se entender melhor os processos de conversão que ocorrem na área. Em seguida, tem-se a descrição dos parâmetros de calibração e parametrização das variáveis estatísticas com intuito de compreender como as variáveis tendem a influenciar a conversão de uso e cobertura da terra. Depois, são apresentados os parâmetros de validação dos dados, e, por último, apresentam-se os resultados da simulação com a descrição dos cenários preditivos de expansão da agropecuária até o ano de 2030 e um cenário de estabilidade.

5.3.1 Transição espacial entre 2015 e 2020

A análise da mudança de uso e cobertura da terra no recorte temporal foi realizada a partir da análise da matriz de transição gerada no Dinâmica Ego. Destaca-se que o ano de referência inicial foi o mapa de uso e cobertura da terra de 2015 e o de referência final foi o mapa de 2020. Como já mencionado, apesar do Dinâmica Ego gerar o total de mudanças entre

as classes que integram os mapas inicial e final, apenas as transições entre as coberturas naturais (formações florestais, savânicas e campestres) e antrópicas agrícolas (pastagens, agriculturas e silvicultura) foram consideradas na análise. No Dinâmica Ego esse processo é calculado a partir da ferramenta Determine Transition Matrix, e resulta em duas informações, a saber, a matriz de passo único (*single step transition matrix*) e a matriz de passos múltiplos (*mult step transition matrix*). Enquanto a primeira contabiliza o percentual de células que mudou de estado para outro no período (ex: floresta → pastagens), a segunda analisa, a partir da matriz ergódica, a taxa de conversão anual.

Na tabela 23 são apresentadas as coberturas anuais em hectares da classe temática para o período analisado. Observa-se que entre 2015 e 2020 ocorreu o predomínio das formações savânicas e campestres, com relativa taxa de perda no período, em contrapartida é observado um significativo incremento de pastagens e de áreas agrícolas.

Tabela 23 - Uso e cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense (2015-2020)

Classes	2015	2020		%
FF	646.687,98	880.015,80	233.327,80	36,08%
FS	2.343.552,84	2.016.165,00	-327.388,00	-13,97%
FC	2.332.351,26	2.218.387,00	-113.965,00	-4,89%
PAS	545.583,96	633.955,70	88.371,72	16,20%
AGR	820.765,98	939.754,60	118.988,60	14,50%
SIL	26.513,37	30.233,52	3.720,15	14,03%
SE	438,57	696,51	257,94	58,81%
CH	42.347,52	36.786,51	-5.561,01	-13,13%
AU	5.684,13	7.308,81	1.624,68	28,58%

Fonte: dados de pesquisa, 2023

Entre 2015 e 2020 as formações florestais despontam com aumento de 36%, e essa classe ganhou área em maior proporção das formações savânicas e em menor proporção das formações campestres. As formações savânicas apresentaram dinâmica de perda, com redução de área de aproximadamente 13%, convertidas em maior proporção em agricultura e numa taxa menor em pastagens. Comportamento semelhante é observado para as formações campestres, cuja perda de área foi de 4%, porém identifica-se que essa classe mostrou um pequeno ganho de área sobre as formações savânicas.

A maior dinâmica de ganho foi manifestada nas pastagens que mostrou expansão de mais de 16%, seguidas pelas classes agricultura e, em menor taxa, a silvicultura com ganho de área de 14% em 5 anos (tabela 24).

Tabela 24 – Matriz de transição global 2015 e 2020 para a Mesorregião Sul Maranhense

		2020								
	_	FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL6	SE7	CH8	AU
2015	FF	0.755	0.173	0.034	0.027	0.0066	0.0006	0.000	0.003	0.000
	FS	0.137	0.611	0.171	0.038	0.039	0.002	0.000	0.001	0.000
	FC	0.021	0.172	0.725	0.059	0.021	0.001	0.000	0.001	0.000
	PAS	0.023	0.101	0.153	0.685	0.032	0.003	0.000	0.001	0.002
	AGR	0.003	0.012	0.020	0.018	0.945	0.001	0.000	0.000	0.000
	SIL	0.017	0.083	0.051	0.042	0.025	0.780	0.002	0.000	0.000
	SE	0.004	0.011	0.355	0.240	0.022	0.004	0.352	0.012	0.000
	CH	0.096	0.120	0.061	0.012	0.003	0.000	0.002	0.704	0.000
	AU	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	1

Fonte: dados de pesquisa, 2022

Na tabela 25 mostram-se os percentuais de transição para as matrizes globais (simples) e anuais (múltiplas) em termos percentuais de pixels que sofreram mudanças por classe:

Tabela 25 - Transição em % no período de 2015 a 2020

Transição 2015→2020	Global	Múltipla (5 anos)
ff→pas	2,70%	0,0060032
ff→agr	0,66%	0,0005566
ff→sil	0,06%	0,0000895
fs→pas	3,81%	0,0088222
fs→agr	3,90%	0,0091612
fs→sil	0,20%	0,0005122
fc→pas	5,82%	0,0145696
fc→agr	2,10%	0,0038462
fc→sil	0,08%	0,0001280

ff- formações florestais; fs – formações savânicas; fc – formações campestres; pas – pastagens; agr – agricultura; sil – silvicultura

Fonte: dados de pesquisa, 2023

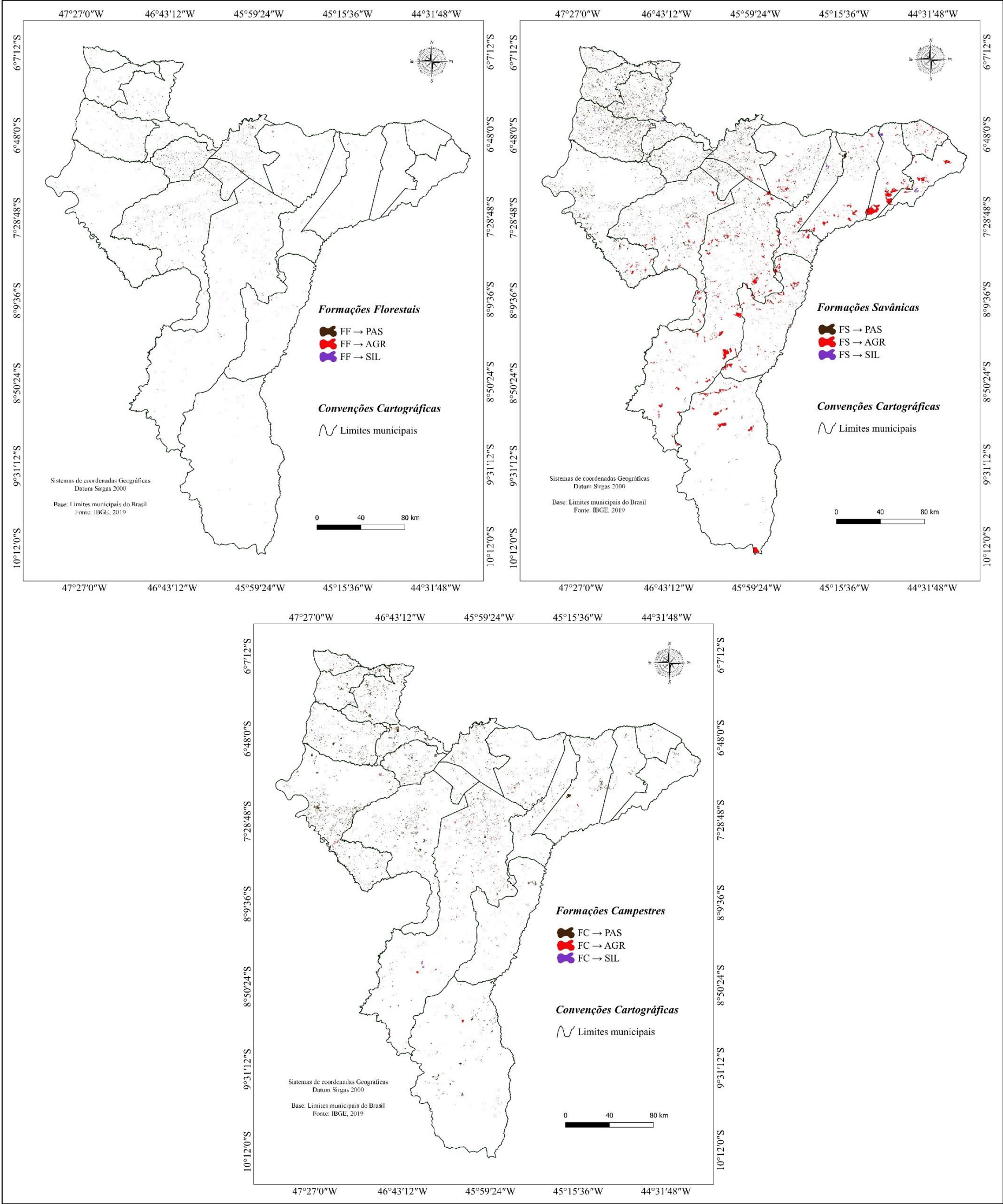
Considerando apenas as classes que serão utilizadas na etapa da modelagem, entre o ano inicial (2015) e final (2020), a conversão das formações campestres para pastagens foi o processo de maior intensidade com uma taxa de transição de 5,8%, seguida pelas conversões de formações savânicas para agricultura com taxa de 3,9% e em menor intensidade a formações savânicas em pastagens com taxa de 3,8%. Esse dado indica que, no período de análise, aproximadamente 134 mil

hectares de vegetação campestre foram convertidos em pastagens, 43 mil hectares em novas áreas agrícolas e 1,9 mil hectares em silvicultura, totalizando perda em torno de 106 mil hectares de área em cinco anos.

Já as formações savânicas apresentaram perda quase 89 mil hectares para pastagens, 101 mil hectares para agricultura e 5,3 mil hectares para silvicultura, uma perda de mais de 344 mil hectares no período de análise. Já a conversão de florestas em pastagens foi de mais de 17 mil hectares, com uma taxa de conversão de 3,78% e 2,68%, respectivamente, ou seja, no período analisado 88 mil hectares de savanas e 17 mil hectares de florestas foram substituídos por pastagens, 4 mil hectares em agricultura e 390 hectares em silvicultura. Esses números mostram que a maior tendência de conversão ocorre sobre as formações savânicas, classe que mais perdeu área no período de análise, as formações campestres

Na figura 72 ilustra-se a distribuição espacial da dinâmica de perda da vegetação de Cerrado para agropecuária entre 2015 e 2020.

Figura 72 – Dinâmica de transição entre as formações



Fonte: dados de pesquisa, 2022

5.3.2 Calibração do Modelo e importância da variável na geração do modelo

A escolha dos determinantes espaciais foi pautada em sua relevância para o processo de mudança de uso e cobertura da terra, tendo em vista que muitos fatores apresentam características impeditivas (proximidade de UC e de corpos hídricos, terrenos íngremes e de altitude elevada), enquanto outros representam fatores para a expansão da agropecuária, como a presença de estradas, áreas já consolidadas, declividade de terreno, entre outros (Apan; Peterson, 1998, Soares-Filho, 2004).

A identificação da atuação de cada fator no processo de mudança de uso e cobertura da terra pode ser realizada pela análise dos pesos e evidências gerados pelo Dinâmica Ego (Kawashima, 2008; Arcorverde, 2014; Assaf, 2016; Aguiar, 2016). Essa abordagem possibilita quantificar a influência de variáveis espaciais na probabilidade de transição entre diferentes classes de uso e cobertura da terra, permitindo inferir como cada variável pode afetar no processo de conversão na área (Kawashima, 2008; Arcorverde, 2014; Bueno, 2018; Nogueira, 2022).

Os pesos e evidências podem apresentar uma gama de valores, isto é, positivos, que sugerem uma predisposição para a ocorrência da mudança de estado da célula, e negativos, que indicam repulsão para a ocorrência da transição. Além disso, valores não significativos (próximos a zero) indicam que na determinada faixa de análise considerada a variável em questão não exerce efeito sobre a transição, ou seja, indicam a ausência de poder explicativo para a ocorrência da transição analisada (Soares-Filho; Rodrigues; Costa, 2009).

Nem todas as variáveis são passíveis de serem analisadas, pois algumas transições ocorrem em faixas ou classes específicas, a exemplo de tipologias de solos que têm significativa restrição a alguns tipos de usos agrícolas, e apresentam relação quando se analisa o modelo de forma geral, pois tendem a influenciar na distribuição do processo quando todo o conjunto de variáveis é considerado.

Grande parte dos processos de conversão analisados apresentou valores de pesos e evidências mais significativos nas variáveis de distâncias dinâmicas para os usos e coberturas da terra já consolidados (distâncias de pastagens, agricultura e silvicultura), com valores mais elevados próximos à classe de origem, e reduzindo à medida que aumenta a distância para a classe.

Conforme Lima (2014), no Cerrado, a proximidade às regiões já consolidadas, seja para fins de urbanização ou para atividades agropecuárias, tende a atrair novas áreas com o avanço da ocupação humana e das áreas de cultivo, indicando que essas variáveis vão apresentar pesos mais significativos próximos à área core, em geral, nos primeiros 3 km, e tende a diminuir à proporção que ocorre o afastamento (Teixeira *et al.*, 2009; De Sá *et al.*, 2012).

Já terrenos que comumente não apresentaram predisposição para atividades agropecuárias de maneira mais intensa – caracterizados por declividade acima de 15%, solos mais frágeis, principalmente Neossolos, Cambissolos e Gleissolos, relativa proximidade de cursos d'água – tendem a apresentar maior restrição à expansão de atividades agropastoris, fator que o modelo mostrou de forma parcialmente evidente, considerando que até mesmo em áreas restritas ocorreu a predisposição a substituição da vegetação por classes antrópicas.

Cabe destacar que esse dado indica maior intensidade em processos de expansão em detrimento da formação de manchas, visto que as variáveis distâncias dinâmicas foram as de maior importância, o que permite inferir que a função de expansão (expander) tende a ocorrer de forma mais intensa que a função de formação de manchas (patcher).

Esse processo, segundo Arcoverde (2014), pode estar relacionado à presença de infraestrutura, como estradas, sistemas de irrigação e instalações de processamento e armazenagens já instalados próximos a áreas mais antigas, sendo então um forçante para que as áreas já consolidadas favoreçam a conversão de áreas adjacentes em maior frequência, pois, para a formação de manchas, tem-se a necessidade de instalação de infraestrutura, principalmente de transporte e armazenagem.

Resultados semelhantes foi encontrado por Arcoverde (2014) que analisou a expansão da cana-de-açúcar e observou peso e evidências positivas em distâncias entre 2 e 8 quilômetros para áreas agrícolas. Lima (2014), por sua vez, ao modelar cenários de desmatamento para o Cerrado, constatou a grande influência de regiões já consolidadas de cultivos de soja como o principal fator para a expansão do desmatamento em toda a área com distância de até 3 km.

Ao simular tendências de desmatamento para o MATOPIBA até 2050, Aguiar (2016) também identificou forte atração positiva para áreas já desmatadas em uma distância de até 2 km. Esse padrão mostra que, ao contrário de outras áreas, como no bioma amazônico, que tem como principal fator de mudança de uso e cobertura da terra as estradas (Soares-Filho, 1998a; Soares Filho *et al.*, 2007), no Cerrado¹⁰⁵ a presença de áreas consolidadas tende a exercer maior poder de atração para a mudança de uso e cobertura da terra que a presença de infraestrutura viária, de armazenagem e proximidade do mercado consumidor.

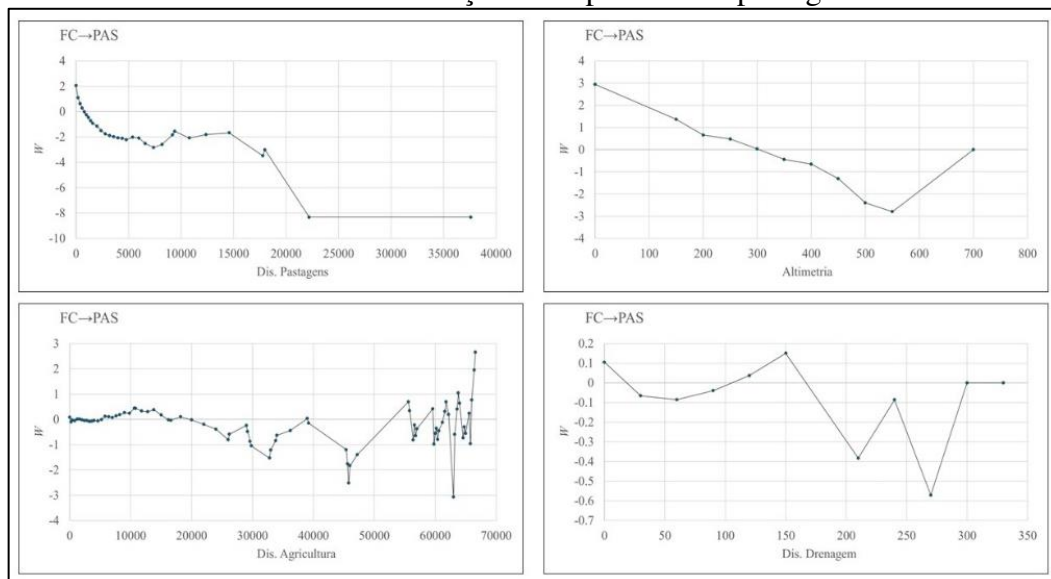
Quanto ao processo de mudança de uso e cobertura da terra no recorte temporal analisado (2015-2020), na mesorregião Sul Maranhense, a conversão de formações

¹⁰⁵ Sobre esse aspecto Lima (2014) considera que a consolidação de áreas agropecuárias próximas a estradas desde a década de 70, como a construção da BR 153 e 364, exerceram forças iniciais para a expansão da agricultura na área

campestres em pastagem foi o fenômeno de maior intensidade no período de análise, seguida pela conversão de formações savânicas em agricultura e em menor intensidade a conversão em formações campestres em agricultura. Essa informação é importante para se entender a dinâmica local, pois o modelo passa a considerar as proporções de expansão e influência diretamente no mapa de probabilidade.

De modo geral, a conversão de formações campestres em pastagens apresentou maiores evidências nos primeiros 1.000 metros de distância (figura 73). A variável mais importante para essa transição foi a distância de pastagens já consolidadas, com maior influência positiva nos primeiros 800 metros, e a partir dessa faixa passa a exercer influência negativa (pesos negativos) entre essas classes. As variáveis altitude e declividade de vertente e solos apresentaram um padrão já esperado, com valores positivos nos terrenos mais planos (declividade de até 5%) e de menor cota altimétrica, com peso positivo na altitude de até 350 metros – sendo os primeiros 150 metros de altitude com maior peso positivo, principalmente sobre Nitossolos, Plintossolos e Argissolos.

Figura 73 – Coeficiente de pesos e evidências das principais variáveis atuantes para a conversão de formações campestres em pastagens



Fonte: dados de pesquisa, 2023

A distância de cidades (núcleos urbanos) também apresentou peso positivo a uma distância de até 800 metros, e, após essa faixa, a probabilidade de conversão passa a representar um fator de impedância na expansão de pastagens. As variáveis distâncias de estradas e distância de drenagem mostraram diferentes tendências de conversão de formações campestres em pastagens. As estradas apresentaram peso positivo em uma faixa de distância

de até 500 metros e repulsão nas faixas acima de 500 metros. Já as distâncias de drenagem apresentaram peso positivo em até 30 metros, indicativo de que essas áreas possuem predisposição para ocupar áreas legalmente impróprias para o uso agrícola, e com maior tendência a não ocorrência com o distanciamento dos corpos hídricos locais.

Dentre as variáveis que exerceram maior força de retração (pesos negativos) para a conversão de formações campestres em pastagens, destacou-se a distância de áreas agrícolas já consolidadas, indicando que tal variável tende a influenciar de forma negativa uma distância de 5,8 km. A partir de 5,8 km, nota-se nova tendência à conversão de formações campestres em pastagens, com pesos positivos até uma distância de 19 km, e esse processo pode estar associado à dinâmica econômica da região que tende a afastar as terras de melhor potencial para a agricultura de outros tipos de uso.

Apesar de menos intensa quando comparada com a conversão de formações campestres em pastagens, a conversão de formações savânicas em pastagens mostrou padrões de mudanças semelhantes. A proximidade de pastagens também foi a variável com maior peso para a conversão das formações savânicas em pastagens, e tal variável mostrou importância positiva nos primeiros 600 metros de distância, inferior ao indicado pelas formações campestres, após essa faixa, ocorreu redução nos valores de pesos e evidências, passando a repelir essa conversão em até 38 km de distância.

A variável distância de cidades também favoreceu a conversão de formações savânicas em pastagens, forte tendência com pesos positivos em até 1 km. Após a faixa do 1 km, os pesos passaram a apresentar pesos negativos, com altos valores a partir de 2,3 km de distância.

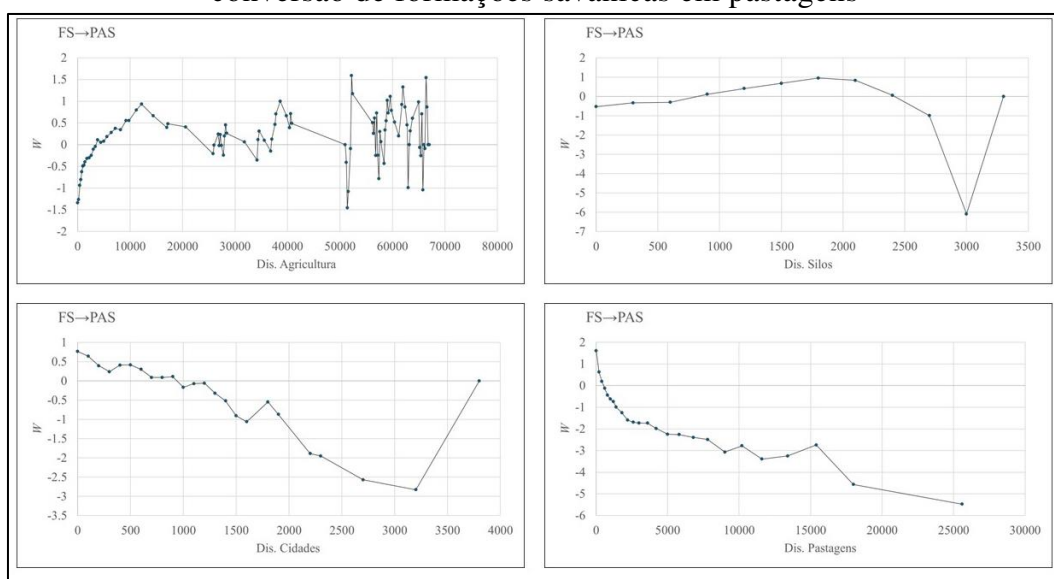
Diversamente do padrão da conversão entre formações campestres em pastagens, a conversão de formações savânicas em pastagens mostrou significativa influência da variável altitude, tendo essa variável a segunda maior taxa de evidência, predominando em terrenos entre 150 e 350 metros, onde os primeiros 200 metros tiveram maior probabilidade de ocorrência. Dos 350 metros de altitude em diante, ocorreu uma diminuição dos valores dos pesos e evidências (valores negativos), com os maiores índices a partir dos 500 metros de altitude.

A declividade mostrou os maiores índices positivos em terrenos suavemente planos (declividade entre 0 e 12%) e com alto valor negativo em terrenos de declividade superior a 15%, porém, entre 2015 e 2020, observou-se a ocupação desses terrenos de forma mais restrita, indicando que mesmo naqueles considerados impróprios para o uso pode ocorrer a transição entre formações savânicas e pastagens.

Essa transição foi favorecida positivamente pela variável distâncias de estradas nos primeiros 500 metros, e com redução (valores negativos) à medida que ocorre o afastamento das vias, indicando repulsão para a conversão entre as classes. A distância dos núcleos urbanos (variável distância de cidades) também mostrou tendência relativamente forte para a conversão das formações savânicas em pastagens, com influência positiva até 800 metros e após essa faixa.

A distância de drenagem mostrou forte probabilidade de conversão de formações savânicas em pastagens nos primeiros 30 metros de distância dos rios. Entre 30 e 120 metros essa variável teve forte tendência à repulsão da conversão (valores negativos), e após essa faixa mostrou forte expectativa de conversão de formações savânicas em pastagens. Na figura 74 é apresentada algumas das principais variáveis que atuaram na conversão de formações savânicas em pastagens.

Figura 74 – Coeficientes dos pesos e evidências das principais variáveis atuantes na conversão de formações savânicas em pastagens



Fonte: dados de pesquisa, 2023

Entre as variáveis que mostraram relativa taxa de repulsão, as distâncias de silos (não representado) e de áreas agrícolas tiveram destaque. A primeira variável citada teve peso negativo (retração da conversão) entre 0 e 900 metros de distância, e peso positivo (tendência à conversão) até 2,7 km. Já a variável distância de agricultura (áreas agrícolas consolidadas) apresentou pesos negativos na distância entre 0 e 3,4 km.

Em ambas, após o limite citado foi observado relativo aumento nos valores dos pesos e evidências, porém, apesar de positivo, ficaram próximos a zero, o que pode representar pouca influência para a geração do mapa de probabilidade, indicando que as terras

próximas a áreas agrícolas consolidadas e toda sua infraestrutura representam barreiras para a expansão agrícola, tornando-se terras reservadas à expansão agrícola, e entrave para outras atividades econômicas.

A conversão de formações florestais em pastagens foi menos intensa quando comparada com as perdas das formações campestres e savânicas, haja vista que tal classe apresentou uma taxa de conversão de aproximadamente 2,7% em cinco anos (2015-2020). A distância de pastagens (áreas já consolidadas) foi a variável com maior peso e evidências, influenciando em uma distância de até 500 metros.

As variáveis declividade e altimetria também apresentaram tendências para expansão sobre as formações florestais semelhantes às identificadas para as formações savânicas e campestres, com as maiores probabilidades de conversão em terrenos de menor cota altimétrica (com pesos positivos de 0 a 250 metros de altitude) e relativamente planos (declividade de até 9%). Essa transição também mostrou significativa probabilidade de ocorrência em Nitossolos e Vertissolos, bem como em Argissolos e Latossolos.

Já a distância de drenagem apresentou valor de pesos e evidências negativo nos primeiros 30 metros de distância dos canais, indicando que nessa faixa a ocorrência de pastagens é menor evidenciada. Entre 30 e 179 metros, apesar de próximos a zero, os pesos tornam-se positivos, indicando que a transição de florestas para pastagens apresenta relativa tendência de ocorrência, contudo, a partir dessa faixa de distância torna-se um fator impeditivo para a conversão de formações florestais em pastagens.

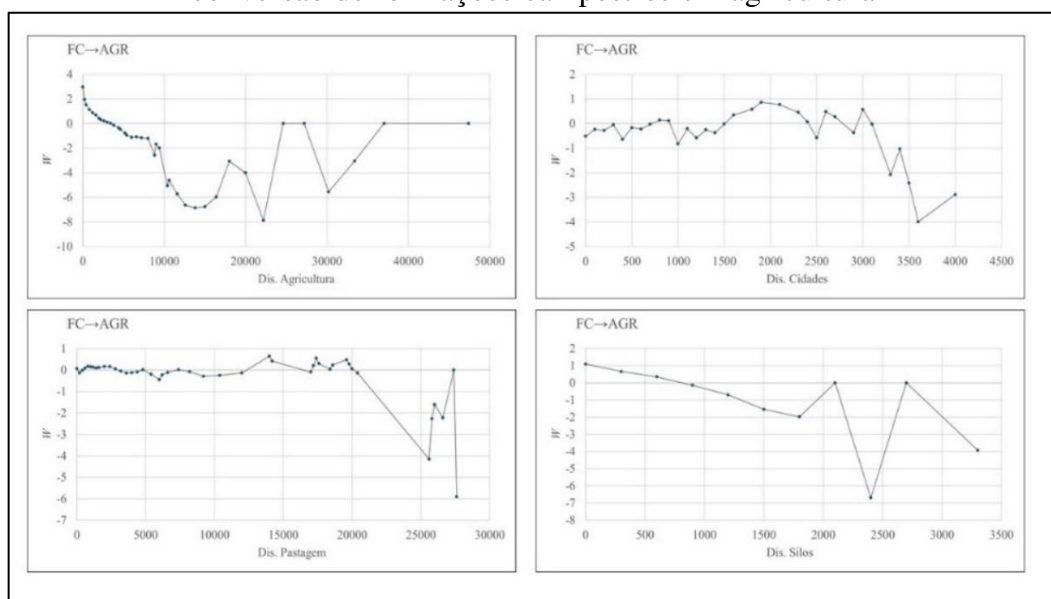
Assim como em outros processos de conversão analisados, a distância de agricultura foi a variável com maior padrão de retração para a conversão de formações florestais em pastagens, influenciando negativamente em uma distância de até 3,6 km, e após essa faixa de distância observa-se uma tendência espacial de conversão entre as classes com ocorrência de até 27 km de distância das áreas agrícolas consolidadas. Depois da última faixa tem-se uma alternância nas características dos pesos e evidências, comportando-se ora positivo, ora negativo e, em maior proporção, sem significância ($= 0$), demonstrando que após essa faixa a recorrência da transição não possui um padrão espacial definido.

A expansão da agricultura apresentou maior taxa de ganho no recorte temporal analisado, com um aumento de aproximadamente 130 mil hectares em cinco anos, porém essa classe representou a segunda e a terceira maior taxa de expansão com índices de 3,94% sobre formações savânicas, 2,10% sobre formações campestres. Nota-se também baixa taxa de expansão sobre as formações florestais (inferior a 1%), indicando baixa probabilidade de ocorrência sobre essa classe. Entre 2015 e 2020, cerca de 43 mil hectares de formações

campestres e 102 mil hectares de formações savânicas foram convertidos em agricultura. Assim como no processo de conversão dessas formações naturais em pastagens (formações savânicas, campestres e florestais), a proximidade das variáveis dinâmicas (distância de agricultura, estradas e silos) forma os principais vetores para a conversão de todas as classes em agricultura.

A conversão de formações campestres em agricultura (figura 75) teve como variável de maior peso e evidências as distâncias de áreas agrícolas consolidadas, com peso positivo em até 3,8 km de distância, ocorrendo majoritariamente em terrenos planos (declividade de até 5%) e de altitude em dois setores distintos, o primeiro entre 300 e 400 metros e o segundo em áreas superiores a 700 metros, principalmente sobre Latossolos¹⁰⁶.

Figura 75 – Coeficientes dos pesos e evidências das principais variáveis atuantes na conversão de formações campestres em agricultura



Fonte: dados de pesquisa, 2023

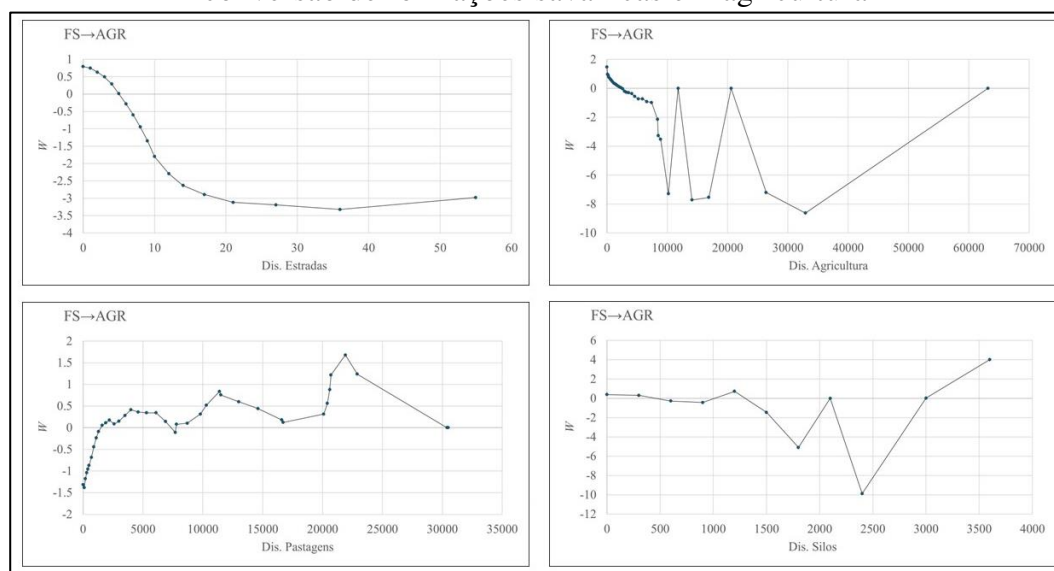
A distância de estradas e de silos também apresentou relativa importância para a conversão entre formações campestres e agricultura. Enquanto a presença de estradas indicou importância positiva de até 500 metros, a distância de silos teve importância significativa até 900 metros, sendo que nos primeiros 300 metros de distância tem maior probabilidade de ocorrência da conversão de formações campestres em agricultura. Após essas faixas, observou-se significativa redução da probabilidade de conversão de formações campestres em agricultura.

¹⁰⁶ Os Latossolos apresentaram pesos positivos para a ocorrência da transição de formações campestres para a agricultura, e as outras unidades pedológicas apresentaram pesos negativos, indicando tendência à retração, ou impedância para a ocorrência dessa transição.

Entre as variáveis com menor potencial de evidência para a transição de formações campestres → agricultura destacou-se a distância de drenagem, com pesos negativos nos primeiros 30 metros, declividade superiores a 5%, caracterizados como Luvisolos e Vertissolos que apresentaram relativa importância negativa para a conversão entre essas classes. Cabe destacar que a variável distância de cidades¹⁰⁷ teve maior potencial de impedância à expansão da agricultura (valores negativos para pesos e evidências), porém com baixa significância, tendo em vista que os limites de distâncias da maioria das faixas indicadas apresentaram valores próximos a zero.

A conversão de formações savânicas em agricultura (figura 76) apresentou maior taxa no período analisado, com o maior índice de evidência associado à variável distância de agricultura, com forte tendência de ocorrência até 2,8 km de distância das áreas agrícolas já consolidadas. A tendência aumenta em terrenos planos – declividade de até 6% – e terrenos de altitude variando de 300 e 450 metros e 500 e 700 metros, e distância de rios superior a 60 metros, com maior potencial em Latossolos e Argissolos.

Figura 76 – Coeficientes dos pesos e evidências das principais variáveis atuantes na conversão de formações savânicas em agricultura



Fonte: dados de pesquisa, 2023

¹⁰⁷ A variável distância de cidades mostrou um padrão espacial inconsistente para pesos e evidências, com taxa negativa nos primeiros 500 metros, positiva entre 500 metros e 1 km, negativa entre 1 e 1,6 km, novamente positiva entre 1,6 e 2,3 km e negativa até 4 km. Essa rotatividade entre as taxas de evidências mostra que a variável não apresentou representatividade para explicar de forma significativa o processo de transição das formações campestres em agricultura, porém optou-se por deixar na análise, considerando que em geral as presenças de cidades tendem a influenciar processos de expansão de desmatamento, como visto em Soares-Filho *et al.* (2004); Macedo *et al.* (2013).

As variáveis distâncias de estradas e silos (armazéns) mostram tendência positiva à expansão em até 500 metros de distância, com redução dos valores de pesos e evidências após essa faixa. Apesar de apresentarem pesos positivos, essas variáveis contribuíram de forma tímida para a probabilidade de ocorrência do processo de conversão das formações savânicas em agricultura, com índices próximos a zero.

Entre as variáveis de maior impedância na transição entre essas classes, destacaram-se as distâncias de rios, com pesos forte negativo entre 0 e 60 metros, e declividade em terrenos superior a 9%, solos hidromórficos (Gleissolos e Neossolos) e próximos a cidades em uma faixa de até 1 km de distância. Essas variáveis estão diretamente associadas a condições naturais que impedem o uso de maquinários agrícolas e em decorrência da legislação ambiental vigente (não em seu contexto geral), que considera reservas legais e APP as faixas próximas a cursos d'água.

A conversão de formações florestais em agricultura apresentou baixa taxa de ocorrência nas áreas, com taxas inferiores a 1%, mesmo padrão identificado para as conversões das formações savânicas em campestres e florestais em silvicultura. Os principais fatores positivos para a ocorrência desses processos estão associados à distância das variáveis dinâmicas, com probabilidade positiva entre 200 e 500 metros de distância.

Dentre as variáveis de maior impedância a tipologia de solos, a declividade de terreno e a distância de drenagem apresentaram os maiores pesos negativos, indicando que as áreas protegidas, o relevo mais acidentado e declivoso e a rede hidrográfica dificultaram a transição de formações savânicas→agricultura, não apenas por efeito da legislação ambiental, mas também porque as regiões de relevo irregular não são favoráveis à agricultura mecanizada já consolidada na área.

Pode-se notar que, em geral, as formações savânicas e campestres apresentaram a maior tendência à conversão em pastagens e agricultura, sendo que a distância dinâmica (áreas agrícolas já consolidadas) foi fundamental para elaboração do mapa de probabilidade de transição para as classes antrópicas.

Ainda que legalmente protegidas pela legislação ambiental vigente (Lei 12.651/2012), que define áreas de proteção permanente em cursos d'água conforme a largura do canal¹⁰⁸, sendo permanentes, intermitentes ou efêmeros, foi evidenciada significativa tendência de expansão de pastagens nessas áreas, com taxa positiva em até 30 metros de

¹⁰⁸ Sendo área mínima de 30 metros para rios de até 10 metros de largura, de 50 metros para rios entre 10 e 30 metros de largura, 100 metros para rios com largura entre 50 e 200 metros.

distância, fato não observado para a expansão da agricultura, que apresentou maior potencial de ocorrência em terrenos distantes de cursos hídricos, de solos pobres e profundos,

Apesar de positiva a distância de estradas, distância de silos e precipitação, não representaram um condicionante significativo para a conversão de áreas naturais em antrópicas. Tal dado tem associação direta a áreas que já se encontram em processo de expansão agrícola consolidado, com as novas expandindo distantes de zonas caracterizadas por uma infraestrutura já instalada, assim como por não considerar as estradas recém-abertas (vicinais), não contempladas pela base oficial utilizada.

Em trabalhos de modelagem dinâmica para a bacia do rio Paraná, Machado (2022) indicou que a transição Floresta Natural¹⁰⁹→Agricultura teve grande influência da variável dinâmica distância de agricultura pré-existente, mostrando que a fronteira agrícola, bem como a infraestrutura associada a ela (presença de estradas, armazéns, silos, dentre outros), tende a ser o fator principal para as significativas taxas de desmatamento nos biomas Cerrados e Mata Atlântica. Maeda *et al.* (2011) também identificaram pesos de evidências negativos para distância de drenagem e unidades de conservação e positivos para setores urbanos, em relação à transição Floresta Natural-Pastagem,

Após ajustes e análise dos pesos e evidências, foram realizados os testes de simulação para a expansão da agropecuária na área. É nessa etapa que ocorre a espacialização dos pesos positivos de evidência considerando todo o conjunto de variáveis explicativas, cujos dados são refletidos nos mapas de probabilidade.

De acordo com Soares-Filho *et al.* (2007) e Bueno (2018), os mapas de probabilidade são calculados para cada transição e não ocorre mais a possibilidade de se separar o comportamento de uma única variável. Bueno (2018) destaca também que os mapas de probabilidade são calculados em escala local, segundo a organização espacial de cada área. Para tanto, é necessário definir alguns parâmetros de ajustes, como as taxas de transições que determinam quanto de área ocorre em cada transição avaliada e a quantidade de mudança de cobertura do solo, definidos a partir dos valores de fragmentos (patcher) e expansão (expander)¹¹⁰, que determinam a precisão da localização, o percentual de transições atribuído à expansão das áreas existentes ou à criação de novas manchas de cobertura da terra, sendo os valores de patcher e expander definidos conforme valores de média, variância e isometria.

¹⁰⁹ Machado (2022) agrupou as classes formações florestais, savânicas e campestres em um único grupo e denominou de Formações Naturais.

¹¹⁰ Atribuiu-se nesse estudo, maior importância para a expansão (expander) devido às mudanças na paisagem ocorrerem de forma mais intensificada nas proximidades de áreas já consolidadas, como mostrados na análise dos pesos e evidências, onde as variáveis distâncias dinâmicas tiveram maior peso positivo para ocorrência da conversão.

Desse modo, foram utilizados os mapas de uso e cobertura da terra inicial (2015), o conjunto de variáveis estáticas, a matriz de transição e o arquivo de pesos e evidências. Para a definição dos parâmetros das funções de expansão (functor expand) e de manchas (functor patcher), definiram-se os tamanhos médios, a variância e a isometria das manchas a serem formadas ou expandidas/contraídas, para a geração da paisagem simulada (tabela 26).

Tabela 26 - Parâmetros utilizados para gerar a paisagem simulada para a simulação entre 2015 e 2020 na Mesorregião Sul Maranhense

	%			Tamanho Médio			Variância			Isometria		
	PAS	AGR	SIL	PAS	AGR	SIL	PAS	AGR	SIL	PAS	AGR	SIL
FF	0,9	0,8	0,8	3.24	4.05	1.72	22.34	46.99	13.85	1.5	1.5	1.5
FS	0,9	0,95	0,8	2.47	23.06	4.5	72.35	31081.58	982.79	1.5	1.8	1.5
FC	0,9	0,85	0,80	6.13	11.29	4.41	230.44	1846.40	164.29	1.5	1.7	1.5

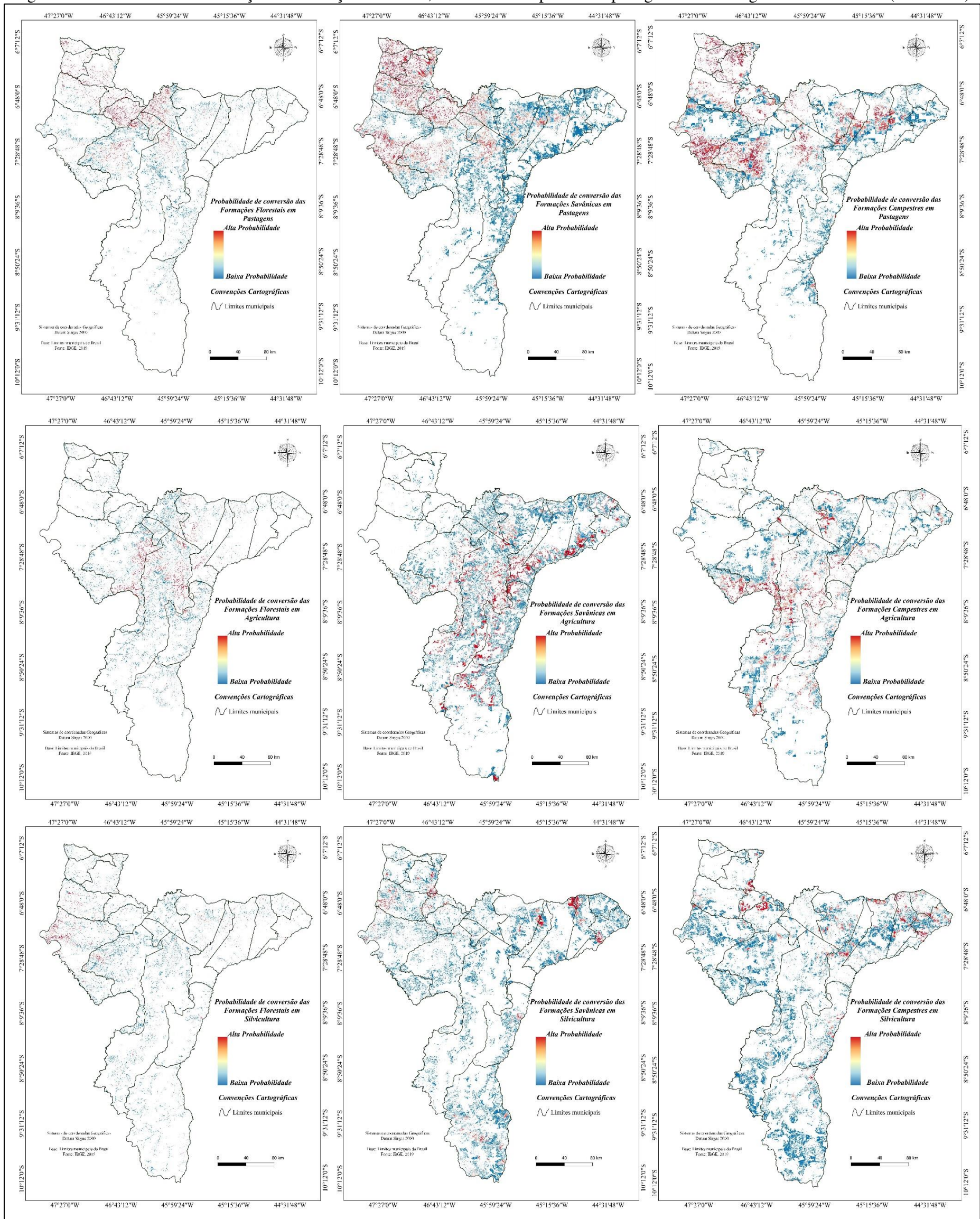
FF – formações florestais; FS – formações savânicas; FC – formações campestres; PAS – pastagens; AGR – agricultura; SIL – silvicultura

Fonte: dados de pesquisa, 2023

Os valores relativos ao tamanho médio e à variância das manchas foram alcançados mediante análise da média e do desvio padrão dos valores de áreas convertidas no período. Para esse propósito, utilizou-se o sig Qgis 3.16 onde calcularam-se as estatísticas descritivas das imagens. É importante ressaltar que foram realizados ajustes dos dados removendo resíduos inconsistentes, definindo a área mínima de um hectare ($\cong 12$ pixels) para essa realização, e a escolha seguiu o padrão do ajuste da segmentação realizado em todas as imagens.

Como resultado, foram gerados nove mapas de probabilidades de transição das células para as pastagens, agricultura e silvicultura (Figura 77), nos quais podem-se identificar as áreas com maior tendência à mudança espacial.

Figura 77 – Probabilidade de transição das formações florestais, savânicas e campestres em pastagens na mesorregião Sul Maranhense (2015-2020)



Fonte: dados de pesquisa, 2023

Como mostrados pelos mapas de probabilidades, existe uma predisposição para a expansão da agricultura na porção centro-sul da área com direcionamento para a porção nordeste da mesorregião, principalmente sobre terrenos de topografia aplainadas, recobertas, em geral, por Latossolos, com maior ocorrência sobre as chapadas e os chapadões que compõem a Serra do Penitente. Essas áreas mostraram elevada probabilidade de conversão para a agricultura, com destaque para os municípios de Balsas, Tasso Fragoso, Alto Parnaíba e São Raimundo das Mangabeiras, porção sul do município de Carolina e porção norte do município de Riachão.

As pastagens apresentaram maior probabilidade de conversão na porção noroeste, como maior ocorrência sobre formações campestres, majoritariamente nos municípios de Campestre do Maranhão, Porto Franco, São João do Paraíso, Feira Nova, Carolina e Estreito, além da porção norte de Balsas. Essas áreas correspondem a setores de menor potencial para a agricultura mecanizada, com maior recorrência de Plintossolos, estado baixa probabilidade de ocorrência na porção nordeste e centro-sul da área, com destaque para os municípios de Carolina, Riachão.

A probabilidade, *a priori*, para a conversão em silvicultura mostrou as maiores divergências entre o real e o estimado, com baixas tendências de expansão para a área, e as maiores probabilidades na porção noroeste e norte da mesorregião, com destaque para os municípios de Estreito, Carolina, São Pedro do Crentes, Benedito Leite, São Felix de Balsas e Loreto.

Após realização das rotinas de simulações, foi realizada a validação do mapa simulado (2020) e o mapa real de 2020. Essa validação foi realizada apenas para os cenários estacionários segundo o índice de similaridade *fuzzy* de acordo com as dimensões de janela de 1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11, conforme discutidos por Soares Filho *et al.* (2007), Benedetti (2010), Campos (2018).

5.3.3 Validação

Benedetti (2010) e Campos (2018) destacam que no processo de validação o modelo simulado é comparado à realidade observada, sendo realizado a partir da comparação entre as diferenças do mapa real e do mapa simulado. Para tal fim, optou-se nesta pesquisa por utilizar uma abordagem implementada no Dinâmica Ego que avalia o nível de acerto da simulação a partir da lógica fuzzy, na qual testou múltiplas janelas de análise visando identificar o comportamento do dado conforme um padrão de vizinhança.

Campos (2018) destaca que o processo de validação é baseado no conceito de *fuzziness of location*, e analisa dados gerados por modelos de simulação identificando o grau de pertinência de um determinado estado conforme diferentes janelas de vizinhança, gerando resultado da validação em valores graduados, o que melhora a calibração do modelo, pois a partir dele é possível saber onde ocorrem mais erros ou mais acertos entre os dados simulados e os dados reais¹¹¹.

Ferrari (2008) considera o método de validação por lógica fuzzy ideal por corresponder a um modelo de concordância flexível, não se baseando no ajuste *pixel a pixel*, mas sim no ajuste por múltiplas resoluções nas quais os valores tendem a ser superiores quando comparados aos índices de concordância rígida. Macedo et al. (2018) destaca que, por esse método de validação desconsiderar as áreas de não-mudança, as quais são responsáveis por sobrestimar índices de ajuste em geral, tem mostrado melhor ajuste que outros métodos de análise de validação em simulações, a exemplo da concordância kappa, porém o autor ressalta a necessidade de realizar a análise visual do dado geral, pois, mesmo com índices aceitáveis, pode ocorrer distorções nos padrões visuais dos dados, indicando que o modelo necessita de ajustes.

Como já mostrado, no Dinâmica Ego a precisão final do modelo simulado é calculada a partir de uma função de decaimento constante que mostra a imprecisão da localização das categorias simuladas a partir da comparação das mudanças observadas e previstas na cobertura da terra de acordo com as diferenças entre os mapas inicial (2015) e final (2020) e o inicial (2015) e o simulado (2020), conforme diferentes janelas de ajustes que variaram desde 3x3 até 11x11.

É importante destacar que os valores do índice tendem a aumentar à medida que o tamanho da janela de amostragem cresce, porém, a partir de certa resolução, é comum ocorrer a saturação do dado, o que torna o método ineficaz para validar dados de simulação estática em janelas superiores a 11x11 (Benedetti, 2010).

De acordo com Elz (2015), não existe uma única resolução correta na qual a precisão possa ser determinada. Barni (2009) considera que simulações com similaridade mínima de 0,50 em janelas de até 5x5 pode ser considerado satisfatório, desde que haja similaridade entre os padrões de distribuição espacial do fenômeno em estudo entre o mapa de referência e o mapa simulado resultante. Andrade *et al.* (2013) considera que valores de

¹¹¹ Tal métrica possibilita identificar quais os parâmetros que necessitam de calibração e, assim, melhorar o ajuste do modelo pois gera um dado com melhor acurácia visual e melhor resultado final

0,50 em janelas mínimas de 3x3 até 5x5 são aceitáveis para simulações que envolvam dados de grandes escalas. Campos (2018), por sua vez, destaca que modelos ajustados com valores mínimos de 0,40 em janelas de 5x5 apresentam significativa precisão quando comparados com dados reais, o que valida seu uso. Soares Filho *et al.* (2002) pontua que simulações que têm apresentado índices de similaridade fuzzy com valores variando entre 0,45 e 0,50 para janelas de amostragem com tamanhos de 7x7 a 11x11 têm denotado ajustes aceitáveis.

Desse modo, considerando a resolução espacial dos dados (30 metros) e o ajuste gerado, estabeleceu-se que em simulações que apresentem taxa de validação mínima de 0,40 em janelas de 5x5 até 7x7 (que corresponde a 25 e 49 pixels ou área entre 2,25 e 4,41 hectares) apresentam valores satisfatórios de aceitação desde que represente acurácia visual próxima à realidade mapeada.

À vista disso, realizou-se uma série de sucessivas simulações no intuito de identificar qual modelo apresentou melhor ajuste¹¹². Na tabela 27 são apresentados os valores de validação em diferentes janelas de análise para os modelos gerados com os melhores resultados visuais próximos à realidade, e que apresentaram valores de validação dentro da janela de até 7x7 com taxas mínimas aceitáveis para continuidade do processo de simulação.

Tabela 27 - Comparação da validação conforme diferentes janelas de análise

	05/03/23		14/05/23		28/07/23		20/11/23		17/12/23		20/01/24	
Janelas	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
1x1	0.21	0.22	0.05	0.24	0.25	0.30	0.27	0.31	0.21	0.22	0.21	0.22
3x3	0.25	0.31	0.06	0.29	0.33	0.38	0.37	0.39	0.28	0.35	0.28	0.35
5x5	0.28	0.33	0.07	0.33	0.40*	0.43	0.45	0.48	0.34	0.40	0.34	0.40
7x7	0.30	0.35	0.08	0.38	0.47*	0.47	0.55*	0.61	0.40*	0.44	0.40	0.44
9x9	0.31	0.35	0.09	0.42	0.50	0.53	0.63	0.67	0.46	0.47	0.46	0.47
11x11	0.32	0.35	0.09	0.45	0.53	0.58	0.68	0.71	0.49	0.51	0.49	0.51

*modelos testados durante a etapa de calibração que apresentaram valores de validação de 40% ou mais em janelas 5x5 e 7x7

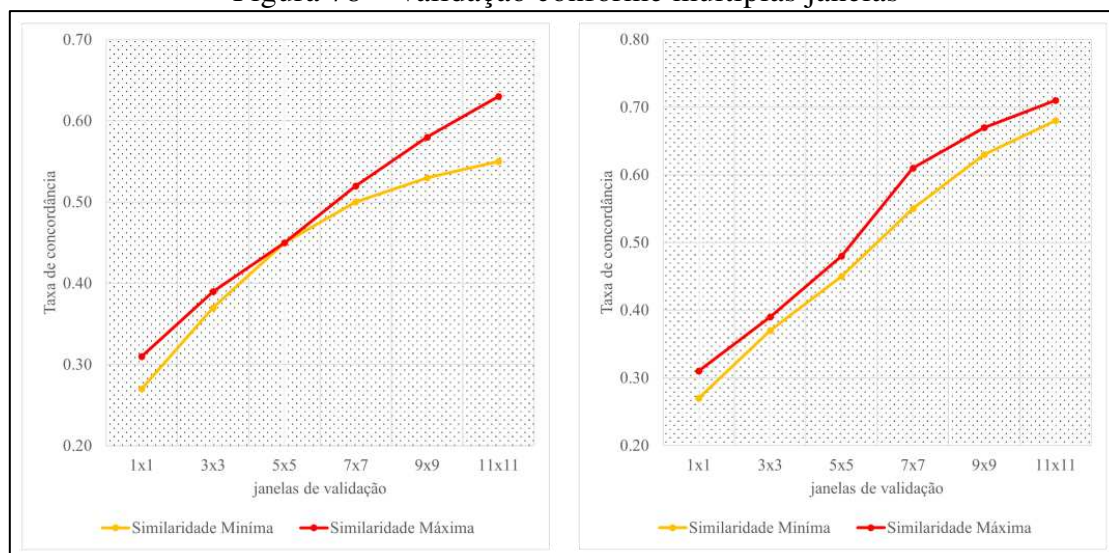
Fonte: dados de pesquisa, 2023

Observa-se que das simulações rodadas, quatro modelos gerados apresentaram relativa concordância com índices em janelas de até 7x7, sendo que dois modelos

¹¹² Cabe destacar que cada modelo foi rodado de forma aleatória 10 vezes, o que gerou um total de 10 mapas por rodada e testou-se aqueles com melhor acuidade visual, buscando identificar melhor ajuste de parametrização entre as variáveis estatísticas utilizadas para explicar os processos de transição, a porcentagem de conversão entre classes e os ajustes isometria, pois patcher e expander utilizou-se os valores resultantes da análise descritiva dos dados

(28/07 e 20/11) alcançaram resultados dentro dos valores aceitáveis em janelas de 5x5. Na figura 78 ilustra-se o padrão de validação comparando os comportamentos espaciais entre as taxas mínimas e máximas dos modelos de simulação, com os melhores resultados para a simulação da expansão da agropecuária sobre o Cerrado na mesorregião Sul Maranhense.

Figura 78 – Validação conforme múltiplas janelas



Fonte: dados de pesquisa, 2023

As informações ilustradas no gráfico de validação mostram que o arranjo espacial das variáveis ajustadas é satisfatório, principalmente pelo tamanho das células utilizadas (30 metros), e pode-se notar também que, em ambos os modelos de melhor valor, as linhas não apresentam distâncias significativas, indicando que as similaridades máximas e mínimas não apresentaram grande variação espacial, tornando o resultado satisfatório, principalmente quando se considera a finalidade de aplicação desses produtos, tendo em vista que, geralmente, em modelagem de mudanças de uso e cobertura da terra tem utilizado dados de baixa resolução espacial, entre 150 (Aguiar, 2015) e 1 km (Ferreira, 2009).

Arcoverde (2014), ao simular tendências de expansão da agricultura da cana-de-açúcar com dados de uso e cobertura da terra reamostrados para 15 metros, encontrou valores de similaridade máxima em janela 7x7 inferiores a 0,45. Ferrari (2008), em simulação de dados para análise das mudanças de uso e cobertura da terra com uso de dados de resolução espacial de 30 metros em Quarta Colônia-RS, encontrou similaridade de 70% em janelas de 7x7. Lima (2014), ao gerar cenários de mudanças da paisagem para o baixo

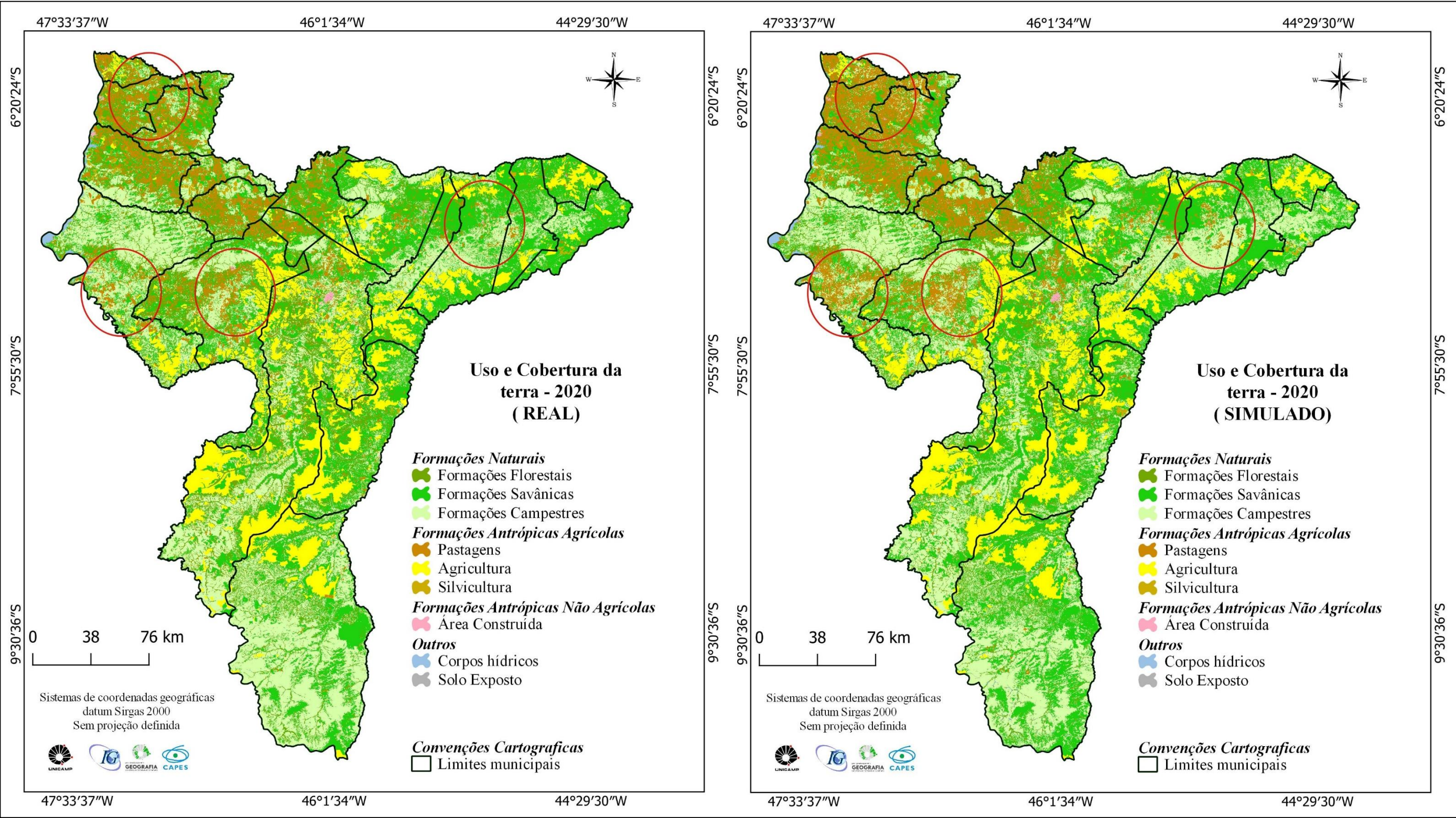
curso do rio Sinos-RS com dados de resolução espacial de 30 metros, encontrou similaridade entre os mapas real e simulado de 63% em janelas múltiplas de 7x7.

Maeda *et al.* (2011), após simularem tendências de desmatamentos na Amazônia no Dinâmica Ego, obtiveram uma similaridade mínima de 40% entre o mapa observado e simulado, em uma janela de 10x10 células, utilizando dados de resolução espacial de 1 km. Kawashima (2015), ao simular expansão urbana sobre remanescentes de vegetação em Santos com imagens de 30 metros de resolução espacial, encontrou similaridades mínimas de 63% em janelas de 7x7 células. Paiva *et al.* (2020) observaram uma similaridade máxima em torno de 70%, para uma janela de 7x7 células.

Machado (2022), ao simular cenários de mudança de uso e cobertura da terra para fins de análise de impactos de eventos de precipitação, com dados do Mapbiomas reamostrados para 150 metros de resolução espacial, encontrou similaridade mínima de $\cong 70\%$ em uma janela de 7x7. Desse modo, utilizou-se o modelo do dia 20/11, que apresentou similaridade mínima de 55% em uma de 4,4 hectares (janela espacial de 7x7 pixel).

Na figura 79 é ilustrada a comparação entre o mapa de uso e cobertura de 2020 e o mapa de uso e cobertura da terra de 2020 simulado obtido a partir da calibração do modelo dinâmico de cenários futuros.

Figura 79 – Comparação entre o mapa real e mapa simulado para a mesorregião Sul Maranhense



Obs: as áreas selecionadas nos círculos correspondem a setores que mostraram divergências entre o dado original (2020 real) e o dado resultante da calibração e validação do modelo.
Fonte: dados de pesquisa, 2023

É possível notar significativa semelhança visual entre o dado real e o dado simulado, principalmente associada à classe agricultura e silvicultura que apresentaram boa concordância visual, porém o modelo superestimou a classe pastagens, sobretudo na porção noroeste da área, com destaque para os municípios de Campestre do Maranhão, Porto Franco e São João do Paraíso. Essa classe também apresentou inconsistências de área na porção central dos municípios de Carolina e Riachão.

Nota-se também que o modelo não conseguiu identificar surgimento de novas áreas agrícolas (patcher), e dois fatores explicam esse processo: o primeiro é que, no processo de calibração, o modelo não foi parametrizado para analisar processos de modificação (mudanças na forma de uso, por exemplo pastagem→agricultura; agricultura→pastagem); a segunda pode estar relacionada ao fato de o modelo ter sido calibrado para expandir de maneira mais intensa (95% para a função de expandir) do que forma manchas (5% para a função patcher).

Em que pese essas isoladas inconsistências, o modelo foi em geral eficiente, pois mostrou significativos acertos, a exemplo da não ocorrência de perdas em remanescentes de vegetação natural protegida, como as áreas que integram o Parque Nacional das Chapadas das Mesas, ou mesmo a não ocupação de áreas

Essa pontuação pode ser observada quando se analisam os padrões de comparação dos índices de áreas mapeadas entre os dados simulados e reais (tabela 28).

Tabela 28 – Comparação entre as áreas mapeadas nos mapas real e simulado para a mesorregião Sul Maranhense em 2020

Classe/Ano	2015	2020	2020-S
FF	648956.16	881195.49	629537.22
FS	2417991.48	2073583.89	2216923.3
FC	2253455.28	2146511.88	2075932.9
PAS	543325.05	629712.45	783643.86
AGR	824283.54	954986.85	974510.37
SIL	28284.57	33288.21	36066.96
SE	407.25	680.67	407.25
CH	41439.78	36401.22	41443.83
AU	5801.49	7583.94	5801.49

FF- formações florestais; FS- formações savânicas; FC- formações campestres; PAS-pastagens; AGR-agricultura; SIL-silvicultura; SE -solo exposto

Fonte: dados de pesquisa, 2023

Enquanto no ano de 2020 (real) foram identificados aproximadamente 881 mil hectares de formações florestais mapeadas, no mapa de 2020 (simulado), o modelo computou 629 mil hectares de área, uma diferença de 251 mil hectares a menos, em comparação com o dado real. As formações savânicas apresentaram diferença de 143 mil hectares de área entre o dado real e o dado simulado, enquanto em 2020 essa classe apresentou um total de 2,0 Mha mapeados, e no dado simulado foram identificados cerca de 2,2 Mha.

As formações campestres apresentaram uma diferença em torno de 70 mil hectares, entre o dado real e o dado simulado, sendo identificada no dado de 2020 (simulado) a maior tendência de perda para o modelo gerado. No dado real (2020), as formações campestres cobriram aproximadamente 2,1 Mha. Já no dado simulado foram identificados cerca de 2,0 Mha, e muito desse dado está associado à expansão de pastagens, como mencionado.

As pastagens estão entre as classes com as maiores diferenças de área entre o dado real e simulado. No ano de 2020 real foram mapeados em torno de 629 mil hectares de pastagens, já o mapa de 2020 simulado mostrou que essa classe apresentou mais 783 mil hectares de área de pastagens, um indicativo de superestimação da classe no modelo simulado.

A agricultura e a silvicultura mostraram relativa estabilidade entre o dado real e o dado simulado quando analisado o comportamento da distribuição espacial dessas classes na área. A agricultura apresentou uma diferença de pouco mais de 19 mil hectares de área entre o real e o simulado. No mapa de 2020 real, a agricultura apresentou área em torno de 954 mil hectares, e no mapa simulado essa classe teve cerca de 974 mil hectares de área. Já a silvicultura obteve uma diferença de quase 2,7 mil hectares, sendo computada no mapa real uma área próxima a 33 mil hectares, e o mapa simulado, por sua vez, indicou uma área coberta de mais de 36 mil hectares por silvicultura.

Na tabela 29 é apresentada a matriz de tabulação cruzada a partir da comparação entre os mapas real e simulado, na qual pode-se observar que, apesar das inconsistências, obtém-se significativa taxa de acerto.

Tabela 29 - Tabulação cruzada entre o dado real e o simulado para o ano de 2020

		2020 Simulado								
		FF	FS	FC	PAS	AGR	SIL	SE	CH	AC
2020 real	FF	54.15%	33.38%	5.10%	*4.86%	*1.95%	*0.13%	0.00%	0.43%	0.00%
	FS	5.26%	67.36%	16.63%	*6.16%	*4.07%	*0.29%	0.00%	0.23%	0.00%
	FC	1.01%	17.20%	72.58%	*6.96%	*2.00%	*0.12%	0.01%	0.11%	0.02%
	PAS	2.45%	11.14%	14.53%	70.25%	1.36%	0.16%	0.01%	0.07%	0.03%
	AGR	0.43%	8.36%	3.45%	1.77%	85.90%	0.07%	0.00%	0.01%	0.00%
	SIL	1.00%	12.24%	5.02%	5.44%	2.46%	73.81%	0.00%	0.02%	0.00%
	SE	0.63%	12.05%	24.78%	20.64%	0.37%	6.94%	22.70%	10.82%	1.07%
	CH	4.57%	6.20%	3.03%	2.94%	0.70%	0.08%	0.01%	82.44%	0.02%
	AC	0.60%	5.33%	8.66%	18.05%	0.21%	0.00%	0.00%	0.19%	66.97%

*taxas de confusão entre o dado real e simulado identificado conforme a tabulação cruzada de dados.

FF- formações florestais; FS- formações savânicas; FC- formações campestres; PAS-pastagens; AGR- agricultura; SIL-silvicultura; SE -solo exposto; CH- corpos hídricos; AC – Área construída

Fonte: dados de pesquisa, 2023

Como observado, a comparação entre o mapa real e o mapa simulado, ambos de 2020, apresentou significativa taxa de manutenção entre as classes. Nota-se que as maiores inconsistências estão relacionadas às formações florestais que apresentaram taxa de permanência de 54% (a menor taxa entre as classes de cobertura analisada), as outras classes apresentaram taxa de compatibilidade superior a 60%, com os melhores resultados para pastagens e agricultura, respectivamente, com taxas de 70% e 85%.

Pontua-se relativo ganho de área na comparação entre os mapas real e simulado, com taxas de erro entre 4% e 7%, em geral com significativa confusão entre as formações savânicas e pastagens, e formações campestres e pastagens, que apresentaram taxa de confusão entre 2% e 7%, quando comparados os mapas real e simulado para o ano de 2020.

5.3.4 Cenário tendencial de expansão agrícola entre 2020 e 2030

A etapa de projeção de expansão da agropecuária para a mesorregião Sul Maranhense teve como ponto de partida informações do mapa de uso e cobertura da terra de 2020, utilizando os mesmos padrões de calibração (matriz de transição, arquivo de pesos e evidências e variáveis estatísticas) do modelo testado e validado para a criação dos cenários de uso e cobertura já discutidos em capítulos anteriores.

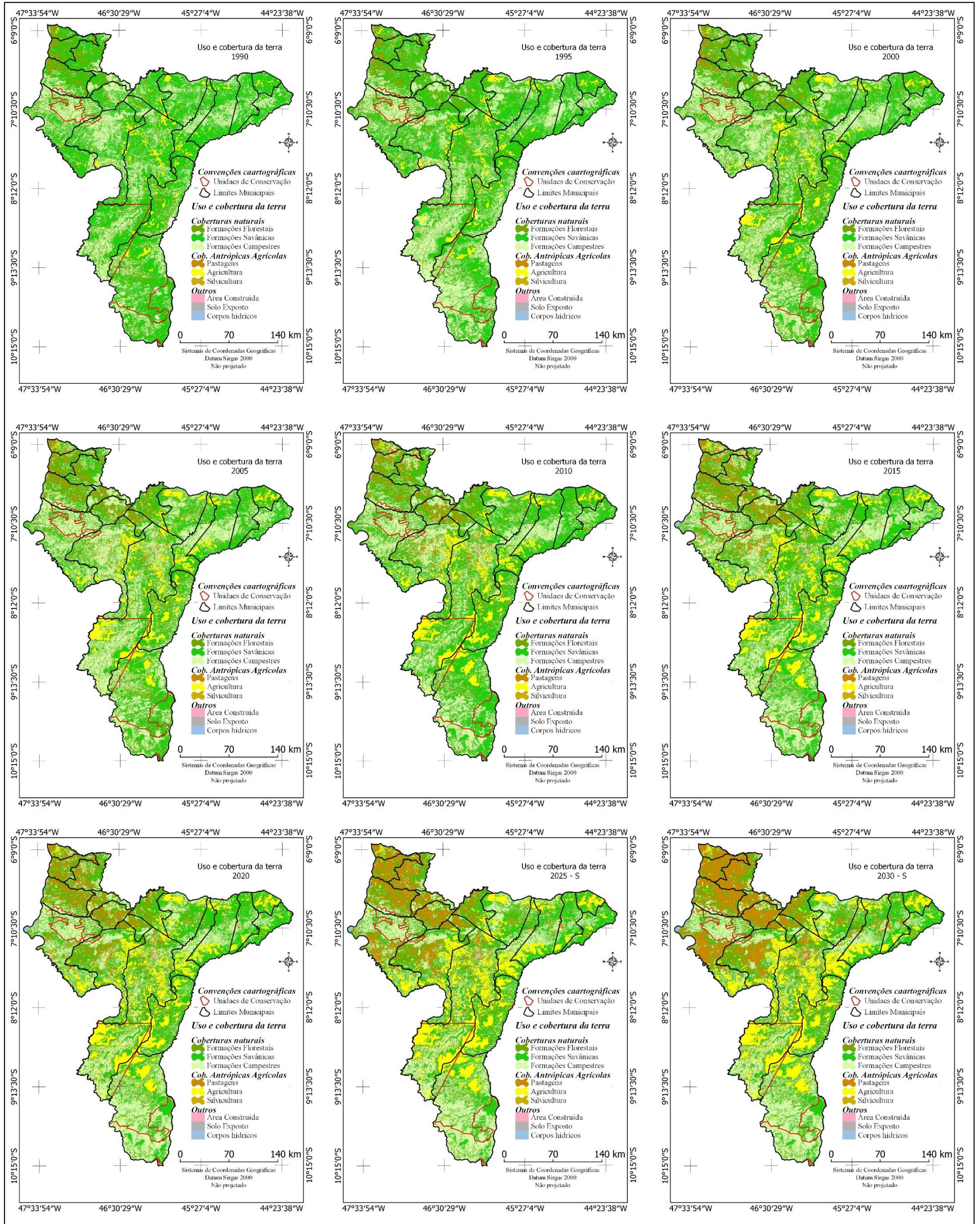
Esse cenário levou em consideração apenas o padrão de mudança observado entre 2015 e 2020 para simular estimativas de expansão da agropecuária em detrimento da redução de cobertura vegetal de cerrado, visto que nessa etapa não considerou processos de regeneração ou mesmo de mudança nas formas de uso da terra, e, como

mencionado, as áreas agrícolas tendem a expandir a partir de áreas já consolidadas. Desse modo, a dinâmica de uso e cobertura da terra mostrou que entre o período de 2020 a 2030 o modelo acentuou mudanças já observadas entre 2015 e 2020, com destaque para a expansão da pastagem e em menor intensidade aumento da agricultura com projeções de expansão de 88% e 29%, respectivamente. A silvicultura, apesar de apresentar relativo ganho com projeções de expansão de aproximadamente 45% até 2030, manteve-se estável no cenário estipulado.

Em contrapartida, vegetação natural de Cerrado mostrou significativas estimativas de perda, com taxas em torno de 19% no mapa de simulação até 2030. Chama a atenção que, mesmo não sendo considerada nessa etapa da análise, a presença de áreas especiais (unidades de conservação integral e sustentável) teve significativa efetividade no controle da perda da vegetação natural de Cerrado, visto que o modelo simulado mostrou que as grandes reservas de vegetação natural remanescentes até 2030 encontram-se dentro de áreas protegidas, a exemplo do Parna. da Chapada das Mesas, Parna. Nascentes do Rio Parnaíba e, em menor proporção, a APA Nascentes do Rio Balsas.

A figura 80 ilustra a distribuição espacial das classes de uso e cobertura da terra entre os anos de 1990 e 2030-S, e cabe destacar que as informações de 1990 até 2020 remetem aos valores de coberturas reais dos dados adquiridos por meio de classificação digital de imagem, já os dados após 2020 correspondem aos valores dos cenários de uso e cobertura da terra elaborados pelo modelo de simulação estática.

Figura 80 – Uso e cobertura da terra entre na mesorregião Sul Maranhense (1990-2030)

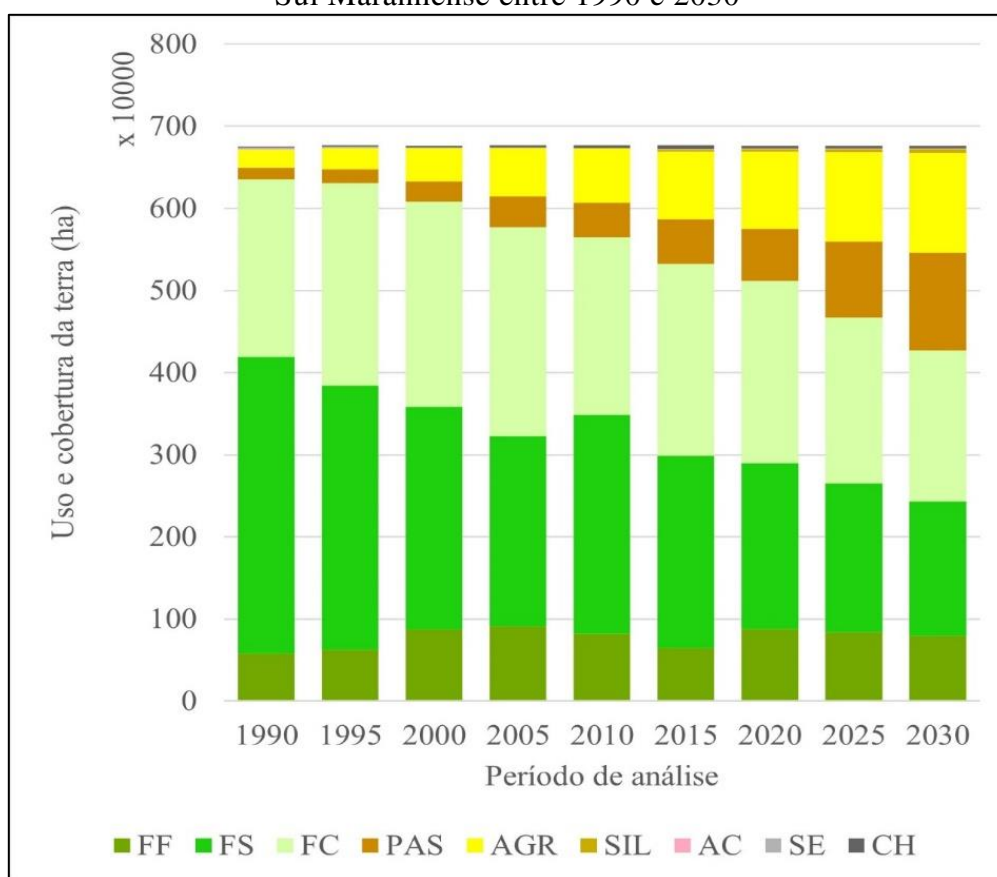


Fonte: dados de pesquisa, 2023

Em termos de área o modelo simulado mostrou que entre 2020 e 2030 a vegetação natural de Cerrado apresenta tendência de perda de mais de 842 mil hectares de área, valores próximos aos observados entre 1990 e 2020 quando aproximadamente 1,2 Mha de vegetação natural do bioma foram convertidos em classes antrópicas na área. A maior tendência de conversão está associada à expansão de pastagens, seguida por agricultura e com menor tendência a conversão para silvicultura.

A figura 81 ilustra a área de cobertura por classe mapeada entre 1990 e 2030, na qual pode-se observar o avanço das coberturas antrópicas (pastagens, agricultura e silvicultura) durante o período de análise e as tendências de crescimento a partir de 2025.

Figura 81 – Padrão real e simulado de uso e cobertura da terra para a mesorregião Sul Maranhense entre 1990 e 2030



FF- formações florestais; FS- formações savânicas; FC- formações campestres; PAS-pastagens; AGR- agricultura; SIL-silvicultura; SE -solo exposto; CH- corpos hídricos

Fonte: dados de pesquisa, 2023

O modelo indica que áreas classificadas como formações campestres apresentam significativa tendência de conversão, sendo contabilizada entre 2020 e 2030 redução de em torno de 310 mil hectares de área convertida, ou seja, passando de uma área de 2,21 Mha no ano de 2020 para uma área projetada de 1,83 Mha no modelo simulado de 2030.

As principais perdas dessa classe foram para as pastagens com projeções de perda de mais 289 mil hectares, seguidas por agricultura com tendência de conversão de cerca de 72 mil hectares, já a silvicultura mostrou projeções de crescimento de 2,6 mil hectares sobre as formações campestres. Nota-se que, mesmo não integrando o modelo, as formações campestres apresentaram pequeno ganho de área de 52 mil hectares das formações savânicas.

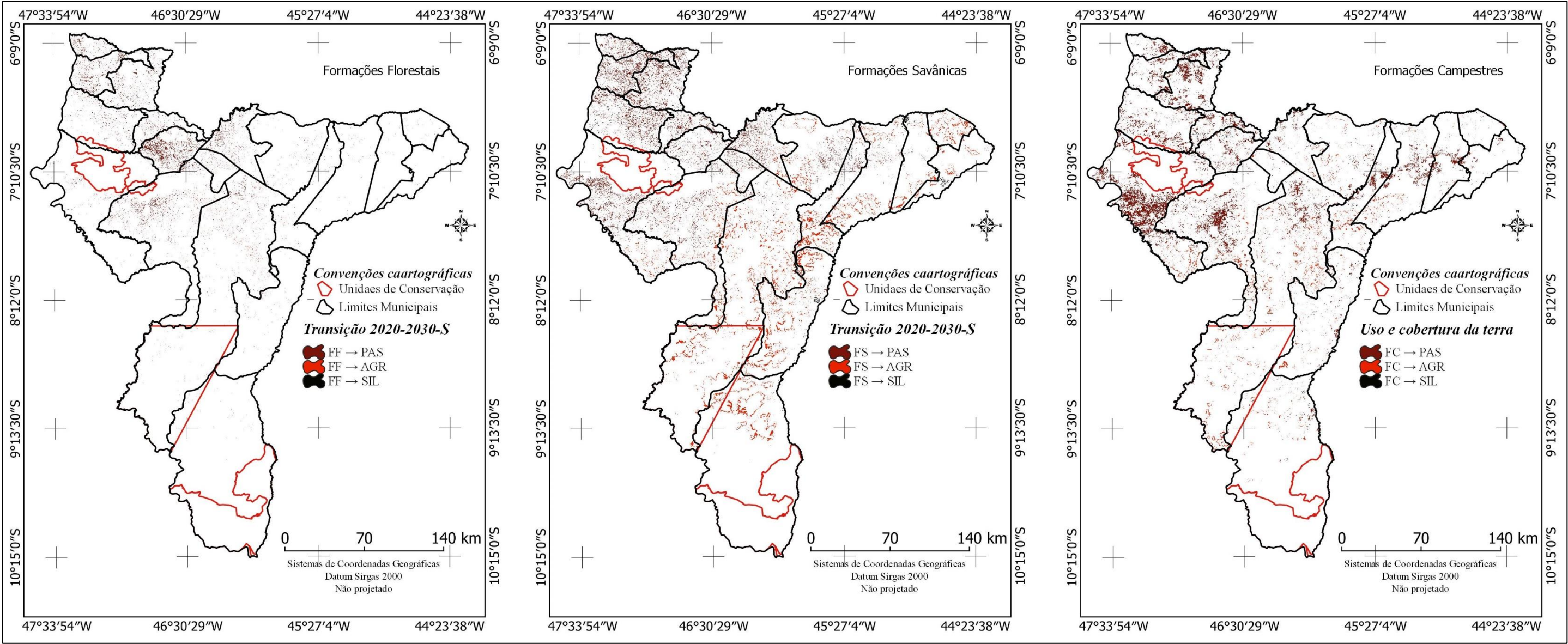
As formações savânicas mostraram as maiores taxas de perdas entre o período real e o modelo simulado para 2030, com uma variação de área de 437 mil hectares, passando de 2,0 Mha em 2020 para 1,6 Mha no mapa simulado para 2030. Essa classe apresentou significativa tendência de conversão para agricultura com projeções de perda em torno de 190 mil hectares de área. No cenário simulado ficou evidenciada a elevada tendência de expansão de pastagens sobre as formações savânicas quando foi contabilizada uma área de cerca de 185 mil hectares de savanas convertidas para pastagens. Pouco mais de 8,6 mil hectares de formações savânicas apresentaram tendências de conversão para a silvicultura.

Apesar de menos intensa, as formações florestais apresentaram relativa probabilidade de perdas de áreas. Entre o ano de 2020 e o dado simulado para o ano de 2030 tem-se uma tendência de perda de mais de 85 mil hectares das formações florestais na área. Grande parte dessa conversão está ligada à expansão de pastagens, conforme dados do modelo simulado, em torno de 75 mil hectares de formações florestais mudaram para pastagens, pouco mais de 8,7 mil hectares converteram-se em agricultura e 519 hectares de floresta em silvicultura.

Esse dado revela que, apesar de consolidada como fronteira agrícola, a área apresenta forte tendência de expansão da agropecuária, pois a expansão da agropecuária entre 2020 e 2030 indica potencial de mais de 833 mil hectares, dos quais 564 mil hectares para pastagens, 258 mil hectares para agricultura e pouco mais de 10 mil hectares para silvicultura.

Como já mencionado, a classe pastagens apresentou maior tendência para expandir sobre as formações campestres e savânicas, porém, mesmo não inserido no modelo preditivo, observou-se uma pequena área de agricultura que se converteu em pastagens ($\cong$ 13 mil hectares), indicando potencial do modelo em projetar a mudança de uso de uma classe agrícola para outra (figura 82).

Figura 82 – Conversão entre as formações florestais, savânicas e campestre na mesorregião Sul Maranhense (2020-2030)



FF- formações florestais; FS- formações savânicas; FC- formações campestres; PAS-pastagens; AGR-agricultura; SIL-silvicultura
Fonte: dados de pesquisa, 2023

Apesar da figura 82 gerar a falsa impressão de que a perda da cobertura vegetal de Cerrado possa ser pequena e/ou homogênea, o padrão de mudança se apresenta de forma heterogênea e desigual. Esse dado pode ser comprovado ao analisar o padrão de mudança por município, pois mostra os municípios que compõem a microrregião de Porto Franco e Gerais de Balsas com significativa estimativa de conversão das formações campestres e savânicas em pastagens e agricultura.

A conversão da formação florestal concentrou-se principalmente na porção noroeste da área, na zona de contato entre o bioma amazônico e cerrado. Essa área apresentou forte tendência à perda de formações campestres em pastagens, e destacam-se os municípios de Porto Franco, Carolina, São João do Paraíso, Estreito e Feira Nova do Maranhão. Já a porção central da mesorregião apresentou elevada estimativa de expansão da agricultura, com destaque para os municípios de Balsas, Tasso Fragoso, São Raimundo das Mangabeiras, e a parte sul do município de Sambaíba, áreas fortemente consolidadas para a produção agrícola moderna.

Tal cenário se aproxima das estimativas de Nogueira (2022) que, ao simular processo de desmatamentos para o Cerrado com dados reamostrados da coleção 7 do Mapbiomas, indicou elevada probabilidade de conversão da vegetação natural para pastagens ($\cong 4,7$ Mha) e para a agricultura ($\cong 1,4$ Mha), além de significativa tendência de expansão da agricultura sobre pastagens ($\cong 3,2$ Mha), o que não foi testado no modelo em análise. O referido autor também mostra o município de Balsas-MA entre os três maiores municípios com estimativa de conversão de vegetação nativa para e entre os 10 municípios do Cerrado com elevado risco ambiental associado ao desmatamento até 2030.

Aguiar (2016), ao modelar cenários de desmatamento para a região do MATOPIBA até 2050, indicou probabilidade de redução entre 21% e 24% da vegetação natural de Cerrado, com significativa tendência à expansão de pastagens e agricultura. Salmona (2013), por sua vez, quando construiu um modelo de simulação para todo o Cerrado, mostrou que, mesmo em cenários otimistas, com implementação de políticas conservacionistas-IPC e restrições a desmatamento em áreas especiais, existem elevadas estimativas de perda da cobertura vegetal de Cerrado. Ressalta-se que os autores citados indicam a região marginal ao bioma amazônico, na qual a área aqui estudada integra, apresentou significativa tendência de perda.

É importante salientar que na simulação para expansão da agropecuária não se mensura de forma precisa a variação espacial na área, pois está condicionado a fatores políticos, econômicos e sociais, porém o modelo construído e aqui apresentado possibilita

análise da tendência de perda da cobertura vegetal natural, uma vez que serão identificadas áreas relativamente vulneráveis ao processo de desmatamento.

Por não ser calibrado para identificar tendências de regeneração, tampouco a expansão da agricultura sobre pastagens, o modelo evidenciou forte tendência a perda da cobertura vegetal natural, esse fator pode estar associado à presença de terras ainda disponíveis para a expansão agrícola, visando que no cerrado, considerando o extrato, o código florestal a taxa de proteção pode variar entre 20% e 35%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade de sensores multiespectrais de nova geração, a bordo das plataformas como os da série Landsat, tem possibilitado a realização de análises de séries temporais com média frequência de revisita, o que ampliou significativamente as oportunidades de realizar estudos de detecção de mudança multitemporal, como desmatamento e expansão agrícola, em maior escala de detalhamento, consoante com o realizado nesta tese.

O uso de imagens Landsat apesar de não se apresentar como inovador, foi essencial para apoiar a interpretação dos diferentes tipos de classes de LULC na área de estudo e possibilitou a criação de uma base atualizada sobre a dinâmica de uso agrícola na área. Principalmente pela integrado com dados regionalizados e atributos texturais processados em ambiente de computação apresentaram um nível de exatidão considerado excelente, com um padrão visual satisfatório para avaliar e analisar alterações e identificar mudanças temporais em nível regional.

Os mapas temáticos gerados a partir das classificações digitais com o algoritmo Random Forest para a classificação de LULC do Cerrado da mesorregião Sul Maranhense apresentaram resultados considerados “muito bom” conforme os índices de acurácia testados. Porém a análise de erros de usuário e produtor identificou algumas diferenças nos resultados das classificações digitais com taxa de confusão – em maior ou menor proporção – entre as pastagens, formações campestres e culturas agrícolas.

Apesar do predomínio da vegetação natural de Cerrado, aproximadamente 1,2 Mha. de vegetação natural foi substituída por outras classes antrópicas em um período de 30 anos. As formações savânicas apresentaram maior taxa de perda no recorte temporal analisado, concentrando 73% de toda a perda de vegetação natural de Cerrado, com uma redução de aproximadamente 44% em 30 anos, convertidas principalmente em agricultura e em menor proporção pastagens. A segunda maior taxa de perda foi registrada pelas formações campestres, porém essa classe apresentou um ganho de cerca de 50 mil hectares em 30 anos, com maior taxa de ganho sobre as formações savânicas.

Padrão diferente é indicado no pelo modelo simulado para a área de estudo mostrou que a proximidade de áreas já convertidas possui maior tendência de conversão. Esse dado também é mostrado pelos índices de validação, que apresentou valores aceitáveis, com valores em janela 5x5 e 7x7 pixels, com taxa de acerto de 55%, ou seja, em uma área de até 0,02 km² tem a tendência de conversão.

Em termos de área, o modelo simulado mostrou que entre 2020 e 2030 a vegetação natural de Cerrado apresenta forte tendência de conversão para áreas agrícolas e pastagens com valores próximos aos observados entre 1990 e 2020. Ou seja, até 2030 entre 10% e 13% da área de cerrado tende a ser convertida em classe antrópica, com maior tendência de conversão para pastagens, seguida por agricultura e com menor tendência à conversão para silvicultura.

Esse dado revela que, apesar de consolidada como fronteira agrícola, a área apresenta forte tendência de expansão da agropecuária. Ao mesmo tempo, debates sobre mudanças no código florestal tendem a priorizar o aumento do desmatamento, principalmente sobre remanescentes de vegetação campestres. Como exemplo, resalta-se o projeto de lei 364/2019 que, se for aprovado, na prática viabiliza o uso de mais de 50% do Pantanal, 32% dos Pampas e 7% do Cerrado.

Tal fato torna a discussão sobre a modelagem apresentada aqui relevante perante o atual cenário político, haja vista que na mesorregião Sul Maranhense existe aproximadamente 2,0 Mha de hectares de vegetação campestre em relativa probabilidade de substituição por agropecuária.

Outros projetos de leis em discussão, como o Programa Nacional de Conversão de Pastagens Degradadas em Sistemas de Produção Agropecuários e Florestais Sustentáveis – PNCPD, tendem a reduzir a taxa de desmatamento em regiões como a mesorregião Sul Maranhense, que possui pouco mais de 1% de toda a pastagens em condições de degradação.

Diante da discussão exposta nesta tese e ratificada ao longo da investigação, observa-se a possibilidade e a necessidade de ampliação em estudos futuros, a partir de novas análises, considerando outros métodos de classificação, critérios de separabilidade de classes e ajustes de parâmetros, tendo em vista a grande diversidade de uso da terra do Cerrado, além de análise de processos de regeneração e tendências otimistas, utilizando padrão de cobertura com menor proporção de conversão, ou mesmo com a utilização e calibração por unidades de conservação.

REFERÊNCIAS

- AB' SABER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza do Brasil**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ADAMI, Samuel Fernando. **Autômatos celulares e sistemas de informações geográficas aplicadas à modelagem da dinâmica espacial da cana-de-açúcar na região de Araçatuba (SP)**. 2011, 172 f. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2011.
- AGUIAR, Ana Paula Dutra; CÂMARA, Gilberto; ESCADA, Maria Isabel Sobral. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, [S.L.], v. 209, n. 2-4, p. 169-188, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.06.019>.
- AGUIAR, Adriano Saraiva. Modelagem da dinâmica do desmatamento na região do MATOPIBA até 2050. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília. 2016.
- ALMEIDA, Juscinaldo Goes. **A luta na/pela terra frente à expansão da soja no município de Brejo – MA**. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís. 2017.
- ALVES, Humberto Prates da Fonseca. **Análise dos fatores associados às mudanças na cobertura da terra no Vale do Ribeira através da integração de dados censitários e de sensoriamento remoto**. 2004. 337 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Sociais, Ciências Sociais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- ALVES, Vicente Eudes Lemos. **Mobilização e modernização nos cerrados piauienses: formação territorial no império do agronegócio**. 2006. 320 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ANDRADE, Marcel Pereira de; RIBEIRO, Celso Bandeira de Melo; LIMA, Ricardo Neves de Souza. Modelagem dinâmica da mudança do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul a partir de imagens Modis e um modelo de sub-regiões. **Revista Brasileira de Cartografia**. N. 68/6, p. 965-978, mai/jun 2016.
- AMARAL, Marcos Vinícius Fernandes; SOUZA, Agostinho Lopes de; SOARES, Vicente Paulo; SOARES, Carlos Pedro Boechat; LEITE, Hélio Garcia; MARTINS, Sebastião Venâncio; FERNANDES FILHO, Elpídio Inácio; LANA, Jacinto Moreira de. Avaliação e comparação de métodos de classificação de imagens de satélites para o mapeamento de estádios de sucessão florestal. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 575-582, jun. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622009000300019>.
- APAN, Armando; PETERSON, James A. Probing Tropical Deforestation: The Use of GIS and Statistical Analysis of Georeferenced Data. In: **Applied Geography**. 1998, pp. 137 - 152.
- ARCOVERDE, Gustavo Felipe Balué. **Modelagem dinâmica espacial da expansão da área de cana-de-açúcar: Quirinópolis (GO)**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São Jose dos Campos, 2014
- ASSIS, Luiz Fernando F. G.; FERREIRA, Karine Reis; VINHAS, Lúbia; MAURANO, Luis; ALMEIDA, Claudio; CARVALHO, Andre; RODRIGUES, Jether; MACIEL, Adeline;

CAMARGO, Claudinei. TerraBrasilis: a spatial data analytics infrastructure for large-scale thematic mapping. **Isprs International Journal Of Geo-Information**, [S.L.], v. 8, n. 11, p. 513, 12 nov. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi8110513>.

ASSIS, Tamiris de. **Dinâmica espaço-temporal da cultura de soja no Cerrado, analisada por meio de estatística espacial e dados físicos, socioeconômicos e ambientais**. 2020. 97 f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica). Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

AUSTIN, Kemen G; GONZÁLEZ-ROGLICH, Mariano; SCHAFFER-SMITH, Danica; SCHWANTES, Amanda M; SWENSON, Jennifer J. Trends in size of tropical deforestation events signal increasing dominance of industrial-scale drivers. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 054009, 1 maio 2017. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa6a88>.

AZEREDO, Marcio. **Mineração e análise de trajetórias de mudança de cobertura da terra: explorando padrões comportamentais no contexto da degradação florestal**. 2017. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

AZZARI, G.; LOBELL, D.B.. Landsat-based classification in the cloud: an opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 202, p. 64-74, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.025>.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution Segmentation—An Optimization Approach for High Quality Multi-Scale Image Segmentation. In **Proceedings of the Angewandte Geographische Informations Verarbeitung XII**; AGIT: Salzburg, Austria, 2000; pp. 12–23.

BACANI, Vitor Matheus; VICK, Erivelton Pereira. FUTURE SCENARIO PREDICTION USING CELLULAR AUTOMATA AND MARKOV CHAIN IN EXPANSION AREA OF FORESTRY OVER BRAZILIAN CERRADO. **Mercator**, [S.L.], v. 19, n. 11, p. 1-23, 15 nov. 2019. Mercator - Revista de Geografia da UFC. <http://dx.doi.org/10.4215/rm2019.e18026>.

BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (org.). **Geodiversidade do estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013. 294 p.

BARBOSA, Liriane Gonçalves. **Análise de sistemas em Biogeografia: estudo diagnóstico da cobertura vegetal da Floresta Nacional de Palmares, Altos, Piauí/Brasil**. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Presidente Prudente. 2015. Disponível em: https://www2.fct.unesp.br/pos/geo/dis_teses/15/ms/liriane-barbosa.pdf. Acesso em: 13 jul. 2020.

BARROS, Paulianno. das Mercês e PÁDUA, Letícia. As noções acerca da paisagem para a geografia: o percurso para o fundamento fenomenológico. In: **Anais do 3 Colóquio Ibero-Americano de Paisagem, Cultural. Patrimônio e projetos**. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

BATISTELLA, Mateus; BOLFE, Edson Luis; VICTORIA, Daniel de Castro; ARAÚJO, Luciana Spinelli (org.). **Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão**. Campinas: Embrapa, 2013. 445 p. Embrapa Monitoramento por Satélite / Relatório Técnico, v. 1 - CDD 333.70981.

BAYMA-SILVA, Gustavo; VICENTE, Luiz Eduardo; SPINELLI-ARAUJO, Luciana; VICTORIA, Daniel de Castro, GOMES, Daniel; TORRESAN, Fabio Enrique. Dinâmica do uso e cobertura da terra na mesorregião Sul Maranhense. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17., 2015, São José dos Campos. **Anais [...]** São José dos Campos : *online* INPE, 2015.

BELGIU, Mariana; DRAGUT, Lucian. Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S.L.], v. 114, p. 24-31, abr. 2016. Elsevier BV
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.

BENEDETTI, Ana Carolina Paim. **Modelagem dinâmica para a simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul**. 2010. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2010.

BERTRAND, Claude; BERTRAND, Georges. **UMA GEOGRAFIA TRANSVERSAL-e de travessias-**: o meio ambiente através dos territórios e das temporalidades. Maringá: Massoni, 2007. 332 p.

BERTRAND, Georges. Paisagem e Geografia Física Global. Esboço Metodológico. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, n. 13, p. 1-27, 1972.

BOLFE, Édson Luis. **Desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa de biomassa e de carbono em sistemas agroflorestais por meio de imagens orbitais EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS POR MEIO DE IMAGENS ORBITAIS**. 2010. 319 f. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

BOLFE, Édson Luis; VICTÓRIA, Daniel de Castro; CONTINI, Elisio; BAYMA-SILVA, Gustavo; SPINELLI-ARAUJO, Luciana; GOMES, Daniel. Matopiba em crescimento agrícola aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de Política Agrícola**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 38-62, out. 2016.

BREIMAN, Leo. Random Forest. **Machine Learning**, [S.L.], v. 1, n. 45, p. 5-32, 2001.

BRIASSOULIS, Helen. **Analysis of Land Use Change**: theoretical and modeling approaches. [S.L.]: Brueckner, 2000. 243 p. In Jackson, W.R. (ed) The web-book of regional science Regional Research Institute, West Virginia University, USA.

BRITO, Alan de. **Heterogeneidade espaço-temporal do desmatamento do Cerrado brasileiro**: estimativas e cenários de emissões de carbono. 2016. 156 f. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

BRITO, Jorge Luis; LEITE, Monoel Reinaldo; FERREIRA, Expedito Jose; LEITE, Marcos Esdras. Evolução geográfica do uso/cobertura da terra na bacia do rio Vieira no norte de Minas Gerais. **Geography Department, University Of São Paulo**, [S.L.], p. 169-194, 2013. Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA).
<http://dx.doi.org/10.7154/rdg.2013.0026.0009>.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford, Clarendon Press, 1994. 193 p.

BURNET, Frederico Lago; OLIVEIRA, Aldrey; MELO Jacilmara; DUTRA, Laércio. (orgs). **Planejamento e gestão de cidades no Maranhão: o executivo municipal e o controle do solo urbano.** São Luís: EDUEMA, 2016.

BUZAI, Gustavo Daniel; BAXENDALE, Claudia. **Análisis socioespacial com sistemas de información geográfica.** 1a ed. – Buenos Aires: Lugar Editorial: GEPAMA, 2006. 400 p.

CABRAL, Maria do Socorro Coelho. **Caminhos do Gado: conquista e ocupação do sul do Maranhão.** São Luís: Sioge, 1992. 264 p.

CAMPOS, Pedro Bueno Rocha. **Modelo de Autômato Celular Aplicado no Estudo da Influência dos Centros Educacionais Unificados na Dinâmica de Transição do Uso e Ocupação do Solo da Periferia de São Paulo.** 2018. 146 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

CARNEIRO FILHO, Arnaldo; COSTA, Karine. **A expansão da soja no Cerrado. Caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável.** São Paulo, SP: Agroícone, 2016, 28 p.

CHAVES, Manuel Rodrigues. Políticas de desenvolvimento regional: Discriminação, (inter) nacionalização e (in)sustentabilidade do bioma Cerrado. In: GOMES, Horiseste (coordenador). **Universo do Cerrado.** v. II. Goiânia: Editora da UCG, 2008. p. 309-351.

CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB Agro.** CEPEA-USP/CNA, jun/dez 2021. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>. Acesso em: 21 nov. 2021

CONSERVAÇÃO INTERNACIONAL. *Hotspots Revisitados: as regiões biologicamente mais ricas e ameaçadas do planeta.* Brasil: 2020. Disponível em: <https://www.conservation.org/docs/defaultsource/brasil/HotspotsRevisitados.pdf>. <https://www.conservation.org/docs/default-source/brasil/HotspotsRevisitados.pdf>. Acesso em: 8 set. 2021.

CHORLEY, R. J. Models in Geomorphology. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). *Models in Geography.* Londres: Methuen e Co, 1967. p. 43-96.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagem de Sistemas Ambientais.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999.

CONGALTON, Russell; Green, A. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 35-46, jul. 1991. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-b](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-b).

CONTINNI, Elisio; MARTHA JÚNIOR, Geraldo Bueno; GASQUES, José Garcia; VIEIRA JÚNIOR, Pedro Abel. O papel das políticas públicas no Cerrado. In: BOLFE, Édson Luis; SANO, Edson Eyji; CAMPOS, Silvia Kanadani. **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções.** Brasília: Embrapa, 2020. p. 59-88.

CÔRTEZ, Julia Corrêa; D'ANTONA, Álvaro de Oliveira. Dinâmicas no uso e cobertura da terra: perspectivas e desafios da demografia. **Revista Brasileira de Estudos de População**, Rio de Janeiro. v. 31, n. 1, p. 191-210, jun. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbepop/a/ZyfwxYfpy395Ghgq95B4zzF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 21 fev. 2022.

CUNHA, Roberto César Costa. **Gênese e Dinâmica da cadeia produtiva da soja no sul do Maranhão**. 2015. 221 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2015

DANTAS, Marcelo Eduardo; SHINZATO, Edgar; BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento; RENK, Jennifer Fortes Cavalcante. Compartimentação geomorfológica. In: BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento (org.). **Geodiversidade do estado do Maranhão**. Teresina: CPRM, 2013. 294 p

DAUNT, Ana Beatriz Pierri. Vetores de mudança na multifuncionalidade da paisagem costeira do litoral norte de São Paulo. 2019. 155 f. Tese (Doutorado em Geografia)-Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2019.

DELANEZE, Marcelo Elias, Modelagem dinâmica espacial aplicada na avaliação das mudanças da cobertura da terra no entorno de dutos utilizando autômatos celulares - estudo de caso do duto Orbel. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro. 2011.

DEMARCHI, Julio Cesar. Modelagem das transformações no uso da terra, de processos erosivos e de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão do São Domingos, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP. 2020, 535 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2020.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Bioma Cerrado. disponível em: <https://www.embrapa.br/cerrados/colecao-entomologica/bioma-cerrado>. acesso em: 13 jan 2021

ESCADA, Maria Isabel Sobral. Evolução de padrões da terra na região centro-norte de Rondônia. 2003. 263 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 2003.

FAN, Fernando Mainardi; BRAVO, Juan Martin; COLLISCHONN, Walter. Modelagem baseada em agentes para a simulação da dispersão de poluentes em cursos d'água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 739-746, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016122280>.

FAO - Food and Agriculture Organization Of The United Nations. **Global Forest Resources Assessments**. [s.d]. Disponível em: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/remote-sensing/fra-2020-remote-sensing-survey/en/>. Acesso em: 18 maio 2022.

FAVARETO, Arilson (coord.); NAKAGAWA, Louise; PÓ, Marcos; SEIFER, Paulo; KLEEB, Suzana. **Entre chapadas e baixões do Matopiba: dinâmicas territoriais e impactos socioeconômicos na fronteira da expansão agropecuária no cerrado**. São Paulo: Prefixo Editorial 92545, 2019. 272 p.

FEITOSA, Antinio Cordeiro; TROVÃO, José de Ribamar. **Atlas escolar do Maranhão: espaço geo-histórico e cultural**. João Pessoa: Editora Grafset, 2006.

FERRARI, Renata. **Modelagem dinâmica do uso e da cobertura da terra da Quarta Colônia, RS**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em:

<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9514/FERRARI%2c%20RENATA.pdf?isAllowed=y&sequence=1>. Acesso em: 23 nov. 2022.

FERREIRA, Maria da Gloria Rocha. **Dinâmica da Expansão da Soja e as Novas Formas de Organização do Espaço na Região de Balsas – MA**. 2008a. 272 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FERREIRA, Antônio José de Araujo. **Políticas territoriais e a reorganização do espaço maranhense**. 2008b. 269 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FERREIRA, Marcos Cesar. Considerações teórico-metodológicas sobre as origens e a inserção do sistema de informação geográfica na geografia. In: VITTE, Antonio Carlos (org.). **Contribuições à história e à epistemologia da geografia**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. p. 101-125.

FERREIRA, Marcos César. Um modelo para formulação de perguntas geoespaciais em sig, baseado na matriz geográfica de Berry (1964). **Geography Department, University Of São Paulo**, [S.L.], p. 252-269, 2013. Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.7154/rdg.2013.0026.0013>.

FERREIRA, Marcos César. **Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São Paulo: Editora Unesp: 2014, 344p.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FROLOVA, Marina. A paisagem dos geógrafos russos: a evolução do olhar geográfico entre o século XIX e o XX. **Revista RAEGA**, n. 13. Curitiba: Editora UFPR, p. 159-170, 2007

GARCÊS JÚNIOR, Audivan Ribeiro. **Variabilidade da chuva e desastres associados à dinâmica hidroclimática no estado do Maranhão**. 2022. 224 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

GEIST, Helmut J.; LAMBIN, Eric F. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. **Bioscience**, [S.L.], v. 52, n. 2, p. 143, 2002. Oxford University Press (OUP). [http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:pcaudf\]2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:pcaudf]2.0.co;2).

GOEDERT, Wenceslau J.; WAGNER, Elmar; BARCELLOS, Alexandre de Oliveira. Savanas Tropicais: dimensão, histórico e perspectivas. In: FALEIRO, Fábio Gelape; FARIAS NETO, Austeclínio Lopes (editores técnicos). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade e agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, Distrito Federal: Embrapa Cerrados, 2008.

GORDIANO, Samuel Ribeiro. **Competitividade regional e globalização**. 1999. 49 f. Tese (Doutorado em Geografia)-Faculdade de Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento digital de imagens**. revisão técnica: Marcelo Vieira e Mauricio Escarpinati. [tradução Cristina Yamagami e Leonardo Piamonte]. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GRINAND, Clovis; RAKOTOMALALA, Fety; GOND, Valéry; VAUDRY, Romuald; BERNOUX, Martial; VIEILLEDENT, Ghislain. Estimating deforestation in tropical humid

and dry forests in Madagascar from 2000 to 2010 using multi-date Landsat satellite images and the random forests classifier. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 139, p. 68-80, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.008>.

GUERRA, Antonio José Teixeira; MARÇAL, Mônica dos Santos. **Geomorfologia ambiental**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 189 p.

GÓES, Ana Maria. **A Formação Poti (Carbonífero Inferior) da Ba-cia do Parnaíba**. 1995, 230 f. Tese (Doutorado em Geociências), Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995.

HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G. Image segmentation techniques. **Proceedings of SPIE**, v. 548, n. 1, p. 2–9, 1985. 3, 6, 35.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 295-309, ago. 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-x](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-x).

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 83, n. 1-2, p. 195-213, nov. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00096-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2)

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Coordenação Geral de Observação da Terra. **PROGRAMA DE MONITORAMENTO DA AMAZÔNIA E DEMAIS BIOMAS. avisos -Bioma Cerrado**. 2021. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads>. Acesso em: 15 abr. 2022.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Coordenação Geral de Observação da terra da. **INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS.PRODES-Incremento anual de área desmatada no Cerrado Brasileiro**. [s.d]. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/cerrado>. Acesso em: 13 jan. 2023.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Coordenação Geral de Observação da Terra. PRODES. **Incremento anual de área desmatada no Cerrado Brasileiro**. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/cerrado/increments>. Acesso em: 05 jan. 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (ed.). **Manual Técnico de uso da terra**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 170 p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (org.). **Município de Balsas**. Disponível em: www.ibge.br/cidade/balsas. Acesso em: 25 nov. 2021.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 2010, resultado geris da amostra**. 2012. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=9748&t=sobre>. Acesso em: 12 dez. 2021.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama do município de Balsas**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/balsas/panorama>. Acesso em: 12 dez. 2021.

- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estado do Maranhão**: Rio de Janeiro: IBGE, 2009. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/mapas/unidades_da_federacao/ma_geologia.pdf. Acesso em: 23 jan. 2021
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 17 maio 2023.
- IMESC, Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos. **Produto Interno Bruto dos Municípios do Estado do Maranhão**. São Luís: Imesc, 2021. 56 p.
- INOCÊNCIO, Maria Erlan. **O PROCEDER e as tramas do poder na territorialização do capital no Cerrado**. 2010. 272 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- KAWASHIMA, Renata Sayuri. **Modelagem Dinâmica espacial das mudanças na cobertura da terra na região portuária da Baixada Santista**. 2015. 190 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015
- KLINK, Carlos A.; MACHADO, Ricardo B. A conservação do Cerrado brasileiro. In: CONSERVAÇÃO INTERNACIONAL (comp.). **Megadiversidade**.: desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade no Brasil. Belo Horizonte: Conservação Internacional, 2005. p. 147-155. Disponível em: https://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/17973/material/Cerrado_conservaca. Acesso em: 13 mar. 2021.
- KÖRTING, Thales Sehn; FONSECA, Leila Maria Garcia; CÂMARA, Gilberto. GeoDMA—Geographic Data Mining Analyst. **Computers & Geosciences**, [S.L.], v. 57, p. 133-145, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.02.007>.
- LAMBIN, Eric F.; TURNER, B.L.; GEIST, Helmut J.; AGBOLA, Samuel B.; ANGELSEN, Arild; BRUCE, John W.; COOMES, Oliver T.; DIRZO, Rodolfo; FISCHER, Günther; FOLKE, Carl. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 261-269, dez. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3).
- LANDIS, J. Richard; KOCH, Gary G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 159, mar. 1977. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/2529310>.
- LEMOS, Linovaldo Miranda. As correntes da Geografia e o movimento de idéias em torno da região. **Revista Geografias**, v. 1, n. 1, p. 2-36, jul-dez. 2005. <https://doi.org/10.35699/2237-549X.13183>.
- LESSCHEN, Jan Peter; VERBURG, Peter H.; STAAL, Steven J. **Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems**. Lucc Report Series No. 7, Nairobi/Wageningen, The International Livestock Research Institute/Lucc Focus 3 Office, 2005, 80p.
- LI, Congcong; WANG, Jie; WANG, Lei; HU, Luanyun; GONG, Peng. Comparison of Classification Algorithms and Training Sample Sizes in Urban Land Classification with Landsat Thematic Mapper Imagery. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 964-983, 24 jan. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6020964>.

LIMA, Enjônas de A. Medeiros; LEITE, Jairo Fonseca. Projeto estudo global dos recursos Minerais da Bacia sedimentar do Parnaíba. Integração geológico-metalogenética. **Relatório final**. Etapa III, Recife. DNPM-CPRM, 1978.

LIMA, Thiago Carvalho. **Modelagem dos vetores de mudança na paisagem no Bioma Cerrado**. 2014. 56 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014

LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 823-870, mar. 2007. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600746456>.

MACARRINGUE, Lucrêncio Silvestre. **Uso e cobertura da terra na região norte de Moçambique entre 2011 e 2020**: uma abordagem baseada em aprendizado de máquina e computação em nuvem. 2022. 157 f. Tese (doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2022.

MACEDO, Rodrigo Campos; ALMEIDA, Cláudia Maria; SANTOS, João Roberto. Modelagem dinâmica espacial da expansão da agricultura em Campos Novos-SC. **Geosul**, [S.L.], v. 33, n. 68, p. 260-285, 19 set. 2018. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). <http://dx.doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n68p260>.

MACHADO, Ricardo B.; RAMOS NETO, Mário B.; PEREIRA, Paulo Gustavo P.; GONÇALVES, Demerval A.; SANTOS, Nazareno S.; TABOR, Karyn.; STEININGER, Marc. Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro. **Relatório técnico não publicado**. Conservação Internacional, Brasília, DF, 2004.

MACHADO, Carolyne Bueno. **Mudanças históricas de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Paraná e seus impactos em eventos extremos de precipitação**. 2022. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2022

MACIEL, A. B. C.; LIMA, Z. M. C. O CONCEITO DE PAISAGEM: DIVERSIDADE DE OLHARES. **Sociedade e Território**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 159–177, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/3505>. Acesso em: 15 ago. 2024.

MANDUJANO, Rodrigo Meiners. “**Disputas territoriais entre o agroextrativismo do pequi e o agronegócio na substituição do cerrado por monocultivos agroindustriais**: estudo das microrregiões de Porto Franco-MA e Jalapão-TO”. 2013. 202 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2013.

MAPA -Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento Secretaria de Política Agrícola. **PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO Brasil 2020/21 a 2030/31 Projeções de Longo Prazo**. Brasília: Mapa, 2021. 102 p.

MARANHÃO, Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico. **Atlas do Maranhão**. São Luís: GEPLAN, 2002.

MAXWELL, Aaron E.; WARNER, Timothy A.; FANG, Fang. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 39, n. 9, p. 2784-2817, 2 fev. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 17, n. 7, p. 1425-1432, maio 1996. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>.

MCINERNEY, Daniel; SUAREZ, Juan, NIEUWENHUIS, Maarten. Extending Forest Inventories and Monitoring Programmes Using Remote Sensing: A Review. **IRISH FORESTRY**. [S.L.], v. 66, n. 1 e 2, 2011

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de (org.). **INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Brasília: [S.L.], 2012. 276 p. Disponível em: <http://memoria.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 25 mar. 2020.

MELVILLE; KRAEMER; GURBAXANI. Review: information technology and organizational performance. **Mis Quarterly**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 283, 2004. JSTOR.
<http://dx.doi.org/10.2307/25148636>.

MEYER, William B.; TURNER II, Billie Lee. Human Population Growth and Global Land-Use/Cover Change. **Annual Review Of Ecology And Systematics**, [S.L.], v. 23, p. 39-61, 1992. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2097281>. Acesso em: 03 out. 2021.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Áreas Especiais**. Ministério do Meio Ambiente, servidor de mapas para consulta pública. Disponível em:
<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em: 12 jan. 2022.

MIRANDA, Evaristo Eduardo de; MAGALHÃES, Lucíola Alves; CARVALHO, Carlos Alberto de. **Proposta de Delimitação Territorial do Matopiba**. Campinas: Embrapa, 2014. 18 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1037313/proposta-de-delimitacao-territorial>. Acesso em: 10 mar. 2020.

MIRANDA, Evaristo Eduardo de; MAGALHÃES, Lucíola Alves; CARVALHO, Carlos Alberto de. **Um Sistema de Inteligência Territorial Estratégica Para o MATOPIBA**. Campinas: Embrapa, 2014. Disponível em:
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139207/1/NT2-SITEMatopiba.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2022.

MIRANDA, Roberto de Sousa. Ecologia política da soja e processos de territorialização no Sul do Maranhão. 2011. 203 f. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2011.

MOLIN, Paulo Guilherme. Dynamic modeling of native vegetation in the Piracicaba River basin and its effects on ecosystem services. 2014. 148f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2014.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 12 03 2023.

MUSEU DO CERRADO. **Memorial do Cerrado**. [s.d]. Disponível em:
<https://museucerrado.com.br/eco-historia/memorial-do-cerrado/>. Acesso em: 21 out. 2022.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, 853 - 858, 2000.

- NEVES, Carlos Eduardo das. **“Geossistema a história de uma pesquisa”**: trajetórias e tendências no estado de são paulo. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.
- NOGUEIRA, Sérgio Henrique de Moura. **Desmatamentos no bioma Cerrado**: contextos, padrões e tendências, impactos e alternativas. 2022. 137 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais - Ciamb), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.
- NOI, Phan Thanh; KAPPAS, Martin. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. **Sensors**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 18, 22 dez. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s18010018>.
- ODUM, Eugène P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1988.
- OLIVEIRA, Aparecida Antonia de. Análise dos impactos das políticas de desenvolvimento regional na bacia do Alto Paraguai. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, [s. l.], v. 6, p. 13-37, dez. 2002.
- OLIVEIRA, Edmar Geraldo de. **A expansão da cana-de-açúcar na região centro-oeste de Minas Gerais**: cenário atual e tendências futuras. 2014. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais-CIAMB) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2014
- PALUDZYSZYN FILHO, Estefano. **A cultura de soja no sul do Maranhão**. EMBRAPA. Centro de pesquisa da Soja-CNPSo. Londrina-PR, 1995.
- PARREIRAS, Taya Cristo; BOLFE, Édson. L.; SANO, E. S.; VICTORIA, Daniel Castro; SANCHES, Ieda Del’Arco.; VICENTE, Luiz Edson. Exploring the Harmonized Landsat Sentinel (HLS) datacube to map an agricultural landscape in the brazilian savanna. **The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, [S.L.], v. -3-2022, p. 967-973, 30 maio 2022a. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-xliii-b3-2022-967-2022>.
- PARREIRAS, Taya Cristo; BOLFE, Édson Luis; CHAVES, Michel Eustáquio Dantas; SANCHES, Ieda Del’arco; SANO, Edson Eyji; VICTORIA, Daniel de Castro; BETTIOL, Giovana Maranhão; VICENTE, Luiz Eduardo. Hierarchical Classification of Soybean in the Brazilian Savanna Based on Harmonized Landsat Sentinel Data. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 14, n. 15, p. 3736, 4 ago. 2022b. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs14153736>.
- PASSOS, Messias Modesto dos. **Biogeografia e Paisagem**. 2. ed. Maringá: [S.N.], 2003. 264 p.
- PATSALIDIS, Stavros; AGAPIOU, Athos; HADJIMITSIS, Diofantos G. Random Forest classification analysis of Sentinel-2 and Landsat-8 images over semi-arid environment in the Eastern Mediterranean. **Geospatial Technologies for Local and Regional Development**. 22, **Conference, Geospatial Technologies for Local and Regional Development**. Limassol, June 17-20, 2019.
- PAVÃO, Mônica. **Modelagem e análise de mudanças do uso e cobertura da terra no entorno de áreas protegidas**: o caso do Parque Estadual da Cantareira- São Paulo. 2017. 125 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade De São paulo. São Paulo, 2017
- PEDROSA, Bianca Maria; CAMARA, Gilberto. Modelagem dinâmica e sistemas de informações geográficas. In: MEIRELLES, Margareth Simões Penello; Camara, Gilberto;

Almeida, Cláudia (editores técnicos). **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007.

PEREIRA, Paulo Roberto Mendes; COSTA, Francisco Wendell Dias; BOLFE, Édson Luis; MACARRINGE, Lucrencio; BOTELHO, Adielson Correa. Comparison of classification algorithms of images for the mapping of the land covering in Tasso Fragoso municipality, Brazil. **Isprs Annals Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences**, [S.L.], v. -3-2021, p. 167-173, 17 jun. 2021. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-v-3-2021-167-2021>.

PEREIRA, Paulo Roberto Mendes. **As transformações históricas e a dinâmica atual da paisagem do município de Pedro do Rosário, Baixada Maranhense**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Geografia, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/c16065ec-cca7-4461-9998-fccebdef556b>. Acesso em: 15 out. 2023.

PETRI, S.; FÚLFARO, V.J. **Geologia do Brasil**. São Paulo: T.A. Queiroz e EDUSP, 1988, 631 p.

PIRIS, Mauro Oliveira. Programas Agrícolas na ocupação do Cerrado. **Sociedade e Cultura**, [s.l.], v. 3, n. 1-2, p. 111-131 já/dez 2000. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70312129007>

POLIZEL, Silvia Palotti; VIEIRA, Rita Marcia da Silva Pinto; POMPEU, João; FERREIRA, Yara da Cruz; SOUSA-NETO, Eráclito Rodrigues de; BARBOSA, Alexandre Augusto; OMETTO, Jean Pierre Henry Balbaud. Analysing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado – MATOPIBA region (Brazil). **Land Use Policy**, [S.L.], v. 109, p. 105713, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105713>.

PONTIUS, Robert G.; SHUSAS, Emily; MCEACHERN, Menzie. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 101, n. 2-3, p. 251-268, fev. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>.

PRASAD, Anantha M.; IVERSON, Louis R.; LIAW, Andy. Newer Classification and Regression Tree Techniques: bagging and random forests for ecological prediction. **Ecosystems**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 181-199, mar. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-005-0054-1>.

PURWANTO; LATIFAH, Siti; YONARIZA; AKHSANI, Farid; SOFIANA, Eva Indra; FERDIANSAH, Mohammad Riski. Land cover change assessment using random forest and CA markov from remote sensing images in the protected forest of South Malang, Indonesia. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S.L.], v. 32, p. 101061, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101061>.

RESCHKE. G. de A; ELOI. C. M. de A; SILVA. R. M. Caracterização climática da Amazônia Maranhense. In: MAERINS. M. B. e OLIVEIRA. T. G. **Amazônia Maranhense: diversidade e conservação**. Belém: MPEG, 2013

RIBEIRO, José Felipe; WALTER, Bruno Machado Teles. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, Sueli Matiko; ALMEIDA, Semíramis Pedrosa de; RIBEIRO, José

Felipe (ed.). **CERRADO Ecologia e Flora**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. V. 1 – capítulos 1 a 14; v. 2 – capítulo 15, Checklist com 12.356 espécies.

ROCHA, Genival Fernandes. **TRAJETÓRIA E CONTEXTO ESPACIAL DOS DESMATAMENTOS NO BIOMA CERRADO**. 2014. 94 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

ROCHA, Rosimary Gomes. O Processo de Ocupação do Sul do Maranhão: dinamismo econômico e des(re)ordenamento territorial. **Interespaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 5-26, 30 jun. 2015. Universidade Federal do Maranhão. <http://dx.doi.org/10.18766/2446-6549/interespaço.v1n1p5-26>.

RODRIGUES, Taíssa Caroline Silva. **Estudo da cobertura e uso da terra na microrregião do Gurupi, Amazônia maranhense, entre os anos de**. 2018. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Geografia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/180371>. Acesso em: 25 mar. 2020.

ROSA, Marcos Reis. Metodologia de classificação de uso e cobertura da terra para análise de três décadas de ganho e perda anual da cobertura florestal nativa na Mata Atlântica. 2020. 292 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2020.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para o planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 208 p.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; Deering, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). **Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium**, Greenbelt, 10-14 December, 1973, SP-351, 309-317.

SALMONA, Yuri Botelho. **Cerrado com C ou com S? Modelagem de cenários futuros para o bioma**. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília. 2013.

SANO, Edson Eyji; ROSA, Roberto; BRITO, Jorge Luís Silva; FERREIRA, Laerte Guimarães. **Mapeamento da cobertura vegetal do bioma Cerrado: estratégias e resultados**. Brasília: Embrapa cerrados, 2007

SANO, Edson Eyji; ROSA, Roberto; BRITO, Jorge Luís Silva; FERREIRA, Laerte Guimarães. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 153-156, jan. 2009.

SANO, Edson Eyji; ROSA, Roberto; BRITO, Jorge Luís Silva; FERREIRA, Laerte Guimarães. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring & Assessment**, v. 166, n. 1-4, p. 113-124, July 2010.

SANO, Edson Eyji; BETTIOL, Giovana Maranhão; MARTINS, Eder de Souza; COUTO JÚNIOR, Antônio Felipe VASCONCELOS, Vinícios; BOLFE, Édson Luis; VICTORIS, Daniel de Castro. Características gerais da paisagem do Cerrado. in: BOLFE, Édson Luis; SANO, Edson Eyji; CAMPOS, Silvia Kanadani (editores técnicos). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília: EMBRAPA, 2020

- SANTOS, Micael Moreira; MACHADO, Igor Elói Silva; CARVALHO, Edmar Vinicius; VIOLA, Marcelo Ribeiro; GIONGO, Marcos. Estimativa de parâmetros florestais em área de cerrado a partir de imagens do sensor Landsat 8. **Floresta**, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 75, 31 mar. 2017. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v47i1.47988>.
- SANTOS, Teresa Cristina Ferreira. A Expansão da Fronteira Agrícola em Balsas/MA. 2011. 170 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2011.
- SAYÃO, Luís Fernando. Modelos teóricos em ciência da informação-abstração e método científico. **Ciência da Informação**. Brasília, v. 30, n 1 p. 82-91 , jan./abr. 2001. <https://doi.org/10.18225/ci.inf.v30i1.941>
- SCARAMUZZA, Carlos Alberto de Mattos; SANO, Edson Eyi; ADAMI, Marcos; BOLFE, Edson Luis; COUTINHO, Alexandre Camargo; ESQUERDO, Júlio César dalla Mora; MAURANO, Luís Eduardo Pinheiro; NARVAES, Igor da Silva; OLIVEIRA FILHO, Francisco José Barbosa de; ROSA, Roberto. LAND-USE AND LAND-COVER MAPPING OF THE BRAZILIAN CERRADO BASED MAINLY ON LANDSAT-8 SATELLITE IMAGES. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L], v. 69, n. 6, p. 1041-1051, jun. 2017.
- SCHIER, Raul Alfredo. Trajetórias do conceito de paisagem na Geografia. **Revista RAEGA** , n. 7. Curitiba: Editora UFPR, p. 79-85, 2003.
- SILVA JUNIOR, Carlos A. da; FRANK, Thiago; RODRIGUES, Taíssa C. S. Discriminação de áreas de soja por meio de imagens EVI/MODIS e análise baseada em geo-objeto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 44-53, jan. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662014000100007>.
- SILVA, Elaine Barbosa da. **A dinâmica socioespacial e as mudanças na cobertura e uso da terra no bioma Cerrado**. 2013. 148 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- SILVA, Félix da; BACANI, Vitor Matheus. Detecção de mudanças e modelagem preditiva do uso da terra e da cobertura vegetal do Pantanal de Aquidauana-MS. **Geosp- Espaço e Tempo** (online), v. 22, n. 2 p. 437-456 [s.l.] 2018. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2018.134659>.
- SOARES-FILHO, Britaldo Silveira. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998a.
- SOARES FILHO, Britaldo Silveira. **Análise da paisagem: fragmentação e mudança**. Belo Horizonte, 1998b.
- SOARES-FILHO, Britaldo Silveira; CERQUEIRA, Gustavo Coutinho; PENNACHIN, Cássio Lopes. Dinamica—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, [S.L.], v. 154, n. 3, p. 217-235, set. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800\(02\)00059-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800(02)00059-5).
- SOARES FILHO, Britaldo, Silveira; CERQUEIRA, Gustavo Coutinho; ARAÚJO, William Leite; VOLL, Eliene. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. **Megadiversidade: Modelagem ambiental e conservação da biodiversidade**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1-2, p. 74-86, dez. 2007.

SODRÉ, Ronaldo Barros. **O Maranhão agrário: dinâmicas e conflitos territoriais**. 2017. 200f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2017.

SOTCHAVA, Victor. B. **Estudos dos Geossistemas: Método em Questão**. IGEO/USP. São Paulo, 1977

SRIVASTAVA, Prashant K.; GUPTA, Manika; MUKHERJEE, Saumitra. Mapping spatial distribution of pollutants in groundwater of a tropical area of India using remote sensing and GIS. **Applied Geomatics**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 21-32, 24 dez. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-011-0072-y>.

TOBLER, Waldo Rudolph. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region, *Economic Geography*, v. 46 (Supplement), p. 234-24, 1970.

THORNTHWAITE, C. **An Approach toward a Rational Classification of Climate**, *Geogr. Rev.*, 38, p. 55–94, 1948, <https://doi.org/10.2307/210739>

TROVÃO, José Ribamar. **O processo de ocupação do território maranhense**. São Luís: Imesc, 2008. 38 p.

USGS - United States Geological Survey. **Landsat 8 (L8) data users handbook**. Florida: Usgs/Nasa, 2013. 114 p. Disponível em: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf. Acesso em: 25 out. 2021.

UVO, Cíntia Regina Bertacchi; NOBRE, Carlos Afonso. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do nordeste do Brasil. Parte II: a influência dos ventos e TSM do Atlântico Tropical. *Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v. 4, n. 10, p. 39-47, out. 1989. (INPE-6033-PRE/2148). Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GTiNp>>.

VALLEJO, L.R. A Dimensão socioambiental do Cerrado brasileiro. 2010. 60p. Disponível em: https://www.academia.edu/38229762/Cap_Livro_Cerrado_pdf. Acesso em 29 set. 2022.

VELDKAMP, A.; VERBURG, Peter H. Modelling land use change and environmental impact. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 72, n. 1-2, p. 1-3, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.04.004>.

VELHO, Otávio Guilherme. A frente agrícola. In: **Frente de expansão e estrutura agrária: estudo do processo de penetração numa área da Transamazônia** [online]. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2009, pp. 87-138.

VITTE, Antonio Carlos. O desenvolvimento do conceito de Paisagem e sua inserção na Geografia Física. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**. Fortaleza, v. 6, n. 11, p. 71-78, 2007

VITTE, Antonio Carlos; SILVEIRA, Roberison Wittgeinstein Dias da. Natureza em Alexander von Humboldt: entre a ontologia e o empirismo. **Mercator – Revista de Geografia da UFC**, v. 9, n. 20, p. 179-195, 2010.

VIEGAS, Josué Carvalho. **Diagnóstico dos agentes e processos atuantes na fragmentação da paisagem na bacia hidrográfica do rio Pericumã, ambiente de Amazônia**

Maranhense. 2015. 175 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2015.

WORD WIDE FUND NATURE (WWF). **Produção e exportação da soja brasileira e o cerrado de 2001 a 2010.** Brasília: WWF, 2020.

XAUD, Maristela Ramalho. **Dinâmica do uso e cobertura da terra na região sudeste de Roraima através de técnicas de detecção de mudanças.** 2013. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

XIMENES, A. C.; ALMEIDA, C. M.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. D. Modelagem Dinâmica do Desmatamento na Amazônia. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 14, p. 370-391, 2008.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S.. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 583-594, jan. 2003. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160304987>.

ZANOTTA, Daniel Capella; FERREIRA, Matheus Pinheiro; ZORTEA, Maciel. **Processamento de imagens de satélite.** São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.

ZHANG, Fang; YANG, Xiaojun. Improving land cover classification in an urbanized coastal area by random forests: the role of variable selection. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 251, p. 112105, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2020.112105>.