



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ANTONIO JOSÉ PEREIRA ALMEIDA

**ANÁLISE ESPACIAL DA ESTRUTURA E FUNCIONALIDADE DA CAATINGA  
LENHOSA NO CONTEXTO DAS PERTURBAÇÕES ANTRÓPICAS**

Recife  
2025

ANTONIO JOSÉ PEREIRA ALMEIDA

**ANÁLISE ESPACIAL DA ESTRUTURA E FUNCIONALIDADE DA CAATINGA  
LENHOSA NO CONTEXTO DAS PERTURBAÇÕES ANTRÓPICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Geografia. Área de concentração: Regionalização e análise regional.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Costa de Souza Cavalcanti

Recife

2025

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Almeida, Antonio José Pereira.

Análise espacial da estrutura e funcionalidade da caatinga lenhosa no contexto das perturbações antrópicas / Antonio José Pereira Almeida. - Recife, 2025.

325f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2025.

Orientação: Lucas Costa de Souza Cavalcanti.

Inclui referências e apêndices.

1. Sensoriamento remoto; 2. Estados dinâmicos; 3. Tipologias da vegetação; 4. Semiárido brasileiro; 5. Fenologia da vegetação. I. Cavalcanti, Lucas Costa de Souza. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ANTONIO JOSÉ PEREIRA ALMEIDA

**ANÁLISE ESPACIAL DA ESTRUTURA E FUNCIONALIDADE DA CAATINGA  
LENHOSA NO CONTEXTO DAS PERTURBAÇÕES ANTRÓPICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em geografia. Área de concentração: regionalização e análise regional.

Aprovada em: 22/08/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Lucas Costa de Souza Cavalcanti (Orientador – Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvínio (Examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba

Dr. Iêdo Bezerra Sá (Examinador Externo)  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

*Dedico esta tese à minha esposa, companheira incansável, cuja presença, compreensão e força tornaram possível cada etapa desta jornada. Aos meus filhos, Maria Luísa e Miguel Antonio, razão maior da minha esperança e inspiração constante. Amo vocês profundamente!*

## AGRADECIMENTOS

Um sonho que se sonha só permanece sonho; mas quando compartilhado, torna-se realidade. Esta tese é a concretização de um sonho coletivo, construído com o apoio, a presença e a colaboração de pessoas que caminharam comigo ao longo desta jornada.

Nesse percurso, agradeço à minha esposa, Tatiana Maria, pelo apoio constante, pela paciência e por estar ao meu lado nos momentos mais desafiadores. Sua presença foi fundamental para que eu seguisse firme até aqui.

À minha família, em especial à minha mãe, Dona Gilda, agradeço por ser base de apoio e incentivo em todos os momentos. À minha irmã Jéssica, pela parceria fraterna e suporte ao longo do caminho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Lucas Cavalcanti, expressei minha sincera gratidão pela orientação criteriosa, pela escuta atenta e pela confiança depositada ao longo desta jornada. Sua ética, clareza intelectual e compromisso com a formação acadêmica foram essenciais para o amadurecimento deste trabalho.

À comunidade acadêmica que integrei durante o doutorado, em especial ao Grupo de Pesquisa em Geografia de Paisagens Tropicais (PAISAGEO), agradeço pelo acolhimento, pela troca de experiências e pela construção coletiva do saber.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPE, agradeço pelo ambiente formativo e pelo apoio institucional. Estendo meus agradecimentos aos professores, pelos debates e contribuições nas disciplinas, e aos técnicos administrativos, com destaque ao secretário Eduardo Véras, pela atenção e eficiência no suporte às demandas acadêmicas.

Aos colegas de turma e do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGeo-UFPE), expressei minha gratidão pelo convívio acadêmico construído ao longo desses anos. Ainda que o contato direto tenha sido, em muitos momentos, breve ou circunstancial, foi o suficiente para gerar admiração pelas trajetórias, pelo comprometimento com a ciência e pela seriedade com que cada um conduz seus próprios caminhos na pesquisa.

Ao amigo e mentor profissional Gustavo Carvalho, pela confiança e apoio ao longo desta caminhada. Sua parceria em projetos profissionais foi decisiva para o avanço de etapas importantes desta trajetória.

Aos amigos que caminham comigo há tantos anos, agradeço profundamente. A Ezequias Santos e Targino Souza, pela parceria desde o mestrado e pelo apoio nos desafios da pesquisa. Aos irmãos de vida João Paulo e Gustavo Neri, pela amizade sólida e presença constante nos momentos marcantes.

A Alexandra Elbakyan, minha gratidão pela contribuição inestimável à democratização do acesso ao conhecimento científico. Sua iniciativa representa um marco na luta pela ciência aberta, especialmente onde há barreiras ao avanço da pesquisa.

Agradeço ao primo Marcos Antônio, pela acolhida generosa e apoio logístico durante as etapas de campo. Ao Elissandro, do Assentamento Riacho Grande, cuja contribuição foi fundamental, colaborando ativamente nas coletas de dados e oferecendo suporte durante as atividades em campo. Ao colega Joelson, pela disponibilidade e comprometimento. E ao amigo Pedro Teia, pela receptividade e colaboração nas coletas realizadas no Refúgio dos Mocós, uma importante iniciativa de conservação da Caatinga.

Aos professores e profissionais que compuseram a banca avaliadora, agradeço pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e pelo olhar atento e crítico dedicado a este trabalho. Em especial, ao Prof. Dr. Lucas Costa de Souza Cavalcanti, à Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio, ao Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza, ao Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima e ao Dr. Iêdo Bezerra Sá, deixo meu reconhecimento pela generosidade intelectual e pelas sugestões que enriqueceram substancialmente esta pesquisa

A todos, minha sincera gratidão!

## RESUMO

A presente tese analisa a dinâmica espacial e funcional da vegetação lenhosa da Caatinga em resposta às perturbações antrópicas crônicas, por meio da integração de séries temporais de imagens orbitais e métricas ambientais. Para isso, foi adotada uma metodologia integrada que combina análise multitemporal de imagens de satélite, análise de fragmentação com métricas da ecologia da paisagem e modelagem de estados dinâmicos da vegetação com base em transições sucessionais, aplicação de índices espectrais, avaliação da eficiência do uso da chuva (RUE), modelagem da fenologia da superfície terrestre (LSP). A abordagem geossistêmica e multiescalar permitiu articular a estrutura da paisagem, os estágios sucessionais da vegetação e os padrões fenológicos extraídos de dados orbitais. O objetivo central é analisar a dinâmica estrutural e funcional da vegetação lenhosa da Caatinga, considerando suas diferentes tipologias e os efeitos das perturbações antrópicas crônicas e das variações ambientais, com ênfase nos processos de fragmentação, sucessão ecológica e transição entre estados dinâmicos da vegetação. A pesquisa foi conduzida no município de Pão de Açúcar (AL), representativo das condições ecológicas e sociais do semiárido nordestino. Os resultados indicaram um avanço da fragmentação entre 2016 e 2024, com redução da conectividade ecológica, aumento da densidade de bordas e maior vulnerabilidade de fragmentos pequenos e isolados à supressão. A análise dos estados dinâmicos revelou o predomínio de formações em estágio de perturbação, especialmente nas tipologias arbustivas abertas, enquanto as formações arbóreas densas apresentaram maior estabilidade ecológica. A produtividade vegetal apresentou forte correlação com a precipitação, com respostas mais expressivas nas formações arbóreas. A eficiência do uso da chuva (RUE) foi superior em vegetações preservadas. A modelagem fenológica indicou que formações arbóreas iniciam seus ciclos produtivos mais cedo e com maior duração, ao passo que tipologias arbustivas degradadas apresentaram sazonalidade mais curta e instável. A pesquisa evidencia a utilidade do sensoriamento remoto no monitoramento ecológico e na definição de áreas prioritárias para conservação e restauração em ecossistemas semiáridos.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto; estados dinâmicos; tipologias da vegetação; semiárido brasileiro; fenologia da vegetação.



## ABSTRACT

This thesis analyzes the spatial and functional dynamics of woody vegetation in the Caatinga biome in response to chronic anthropogenic disturbances, through the integration of remote sensing time series and environmental metrics. An integrated methodology was adopted, combining multitemporal analysis of satellite imagery, fragmentation assessment using landscape ecology metrics, modeling of vegetation dynamic states based on successional transitions, application of spectral indices, evaluation of Rain Use Efficiency (RUE), and Land Surface Phenology (LSP) modeling. The geosystemic and multiscale approach allowed the articulation of landscape structure, vegetation successional stages, and phenological patterns derived from orbital data. The central objective is to analyze the structural and functional dynamics of Caatinga woody vegetation, considering its different typologies and the effects of chronic anthropogenic pressures and environmental variability, with emphasis on fragmentation processes, ecological succession, and transitions between dynamic states. The research was conducted in the municipality of Pão de Açúcar (Alagoas), representative of the ecological and social conditions of the Brazilian semi-arid region. The results indicated a significant increase in fragmentation between 2016 and 2024, with reduced ecological connectivity, increased edge density, and greater vulnerability of small and isolated fragments to suppression. The analysis of dynamic states revealed a predominance of disturbed formations, especially in open shrub typologies, while dense arboreal formations exhibited greater ecological stability. Vegetation productivity showed a strong correlation with precipitation, with more pronounced responses in arboreal formations. Rain Use Efficiency (RUE) was higher in preserved areas. Phenological modeling indicated that arboreal formations begin their productive cycles earlier and last longer, whereas degraded shrub typologies showed shorter and more unstable seasonality. The research highlights the potential of remote sensing as an effective tool for ecological monitoring and for identifying priority areas for conservation and restoration in semi-arid ecosystems.

**Keywords:** remote sensing; dynamic states; vegetation typologies; Brazilian semi-arid; vegetation phenology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Mapa de localização da área de estudo .....	27
Figura 2 -	Quantidade de artigos publicados por ano sobre sensoriamento remoto aplicado à vegetação da Caatinga.....	29
Figura 3 -	Linha temporal dos principais marcos e avanços técnicos do sensoriamento remoto na vegetação da caatinga .....	32
Figura 4 -	Mapa das técnicas mais recorrentes da aplicação do sensoriamento remoto na vegetação da Caatinga.....	40
Figura 5 -	Cenas das imagens fração.....	58
Figura 6 -	Fluxograma dos processamentos dos dados para obtenção do LULC.....	60
Figura 7 -	Fluxograma dos processamentos dos dados para extração da vegetação da caatinga lenhosa. ....	63
Figura 8 -	Comparação do padrão e evolução as proporções das classes nos anos analisados.....	65
Figura 9 -	Mapas dos padrões de uso e cobertura da terra para os anos de 1987, 2005 e 2024.....	67
Figura 10 -	Estados de mudanças da caatinga lenhosa no período de 1987 a 2024. ....	70
Figura 11 -	Dinâmica e alteração da caatinga no período de 1987 a 2005.....	71
Figura 12 -	Dinâmica e alteração da caatinga no período de 2005 a 2024. ....	71
Figura 13 -	Evolução da vegetação Lenhosa da Caatinga no período de 2016 a 2024. ....	74
Figura 14 -	Área da vegetação lenhosa ao longo período analisado.....	76
Figura 15 -	Variação da cobertura da vegetação lenhosa ao longo período analisado. ....	76
Figura 16 -	Exemplos de perturbações detectadas na área de estudo .....	79
Figura 17 -	Evolução do número de fragmentos .....	80
Figura 18 -	Dinâmica dos tamanhos dos fragmentos da vegetação lenhosa.....	81
Figura 19 -	Dinâmica temporal das distâncias média entre os fragmentos da vegetação lenhosa .....	83
Figura 20 -	Vista parcial da área de estudo evidenciando o padrão de fragmentação da vegetação nativa da Caatinga.....	86
Figura 21 -	Fluxo de processamento e modelagem para estimativa da estrutura da vegetação .....	95
Figura 22 -	Processo para classificação da caatinga arbustiva-arbórea.....	98
Figura 23 -	Mapa da classificação das tipologias de caatinga lenhosa da área de estudo. ....	101
Figura 24 -	Localização das parcelas amostrais .....	104

Figura 25 -	Registros da Caatinga Arbustiva Aberta na área de estudo. ....	105
Figura 26 -	Registros das características típicas da Caatinga Arbórea Aberta na área de estudo .....	106
Figura 27 -	Panorama de parte da Caatinga Arbórea Aberta presente da área de estudo..	107
Figura 28 -	Registros das características típicas da Caatinga Arbórea Densa na área de estudo, evidenciando a presença de árvores altas e uma cobertura densa que representa uma das formações mais imponentes da Caatinga Lenhosa.....	108
Figura 29 -	Panorama de parte da Caatinga Arbórea Densa presente da área de estudo...	109
Figura 30 -	Registros das características típicas da Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta na área de estudo.....	110
Figura 31 -	Mapas da classificação tipológica dos anos de 2016 a 2024. ....	112
Figura 32 -	Proporção das áreas (km <sup>2</sup> ) das tipologias da caatinga lenhosa .....	113
Figura 33 -	Presença da <i>Mimosa tenuiflora</i> em área de pousio, indicando processo de regeneração. ....	115
Figura 34 -	Ciclo de sucessão e perturbação da vegetação lenhosa da caatinga presente na área de estudo.....	118
Figura 35 -	Representação dos ciclos dinâmicos dos estágios vegetativos da caatinga lenhosa .....	118
Figura 36 -	Processos ecológicos das tipologias da caatinga lenhosa no período de 2016-2024.....	122
Figura 37 -	Mapa de Distribuição Espacial do EVI Médio entre 2016 e 2024. ....	138
Figura 38 -	Médias anuais do EVI.....	140
Figura 39 -	Distribuição do EVI por Estados Dinâmicos e Tipologias da Caatinga .....	141
Figura 40 -	Distribuição espacial das tendencias Mann-Kendall do EVI.....	143
Figura 41 -	Distribuição espacial da estimativa da inclinação Theil-Sen.....	144
Figura 42 -	Tendência da série temporal do EVI da caatinga lenhosa da área de estudo..	145
Figura 43 -	Tendência da série temporal do EVI da caatinga lenhosa das tipologias da área de estudo .....	146
Figura 44 -	Distribuição espacial do Coeficiente de Variação do EVI.....	149
Figura 45 -	Relação entre os valores EVI médios e o coeficiente de variação em diferentes tipologias.....	152
Figura 46 -	Relação temporal entre EVI e precipitação de 2016 a 2024.....	153
Figura 47 -	Distribuição Espacial do EVI na Estação chuvosa .....	154
Figura 48 -	Distribuição Espacial do EVI na Estação Seca.....	154
Figura 49 -	Médias anuais do EVI nas estações chuvosas e secas .....	156

Figura 50 -	Correlação linear entre o EVI e a precipitação .....	157
Figura 51 -	Distribuição das relações positivas significativas entre o EVI e a precipitação .....	158
Figura 52 -	Relação entre EVI e precipitação quanto as tipologias da caatinga.....	159
Figura 53 -	Relação entre a precipitação mensal e o Índice de Vegetação EVI quanto os padrões climáticos do ENOS .....	161
Figura 54 -	Correlação entre as anomalias de SST e EVI .....	162
Figura 55 -	Distribuição Espacial da Média Anual da RUE (2016 a 2024) .....	182
Figura 56 -	RUE nos Meses de Janeiro a março.....	183
Figura 57 -	RUE nos Meses de Maio a julho.....	184
Figura 58 -	RUE nos Meses de Outubro a dezembro .....	185
Figura 59 -	Distribuição espacial do CV do RUE .....	186
Figura 60 -	Evapotranspiração Média Anual.....	189
Figura 61 -	Evapotranspiração nos Meses chuvosos .....	190
Figura 62 -	Evapotranspiração nos Meses secos .....	191
Figura 63 -	Relação entre a Evapotranspiração e a RUE.....	192
Figura 64 -	Umidade do Solo Média Anual.....	194
Figura 65 -	Umidade do Solo nos Meses Chuvosos .....	195
Figura 66 -	Umidade do Solo nos Meses Secos .....	196
Figura 67 -	Relação entre a RUE e a umidade do solo.....	197
Figura 68 -	Temperatura da Superfície Média Anual.....	199
Figura 69 -	Relação entre a umidade do solo na zona radicular e a LST .....	200
Figura 70 -	Relação entre a RUE e a LST .....	201
Figura 71 -	Distribuição dos valores médios do RUE, Evapotranspiração, umidade do solo na zona radicular e LST por Estados Dinâmicos e Tipologias da Caatinga ...	203
Figura 72 -	Distribuição espacial do TWI .....	207
Figura 73 -	Exemplo de áreas em persistência da tipologia CAA em área de baixos valores de TWI .....	208
Figura 74 -	Fluxograma da modelagem LSP para obtenção das métricas fenológicas .....	218
Figura 75 -	Ilustração conceitual das métricas da curva LSP derivadas neste estudo.....	219
Figura 76 -	Fluxograma do processamento e modelagem para estimativa da densidade da biomassa.....	221
Figura 77 -	Distribuição espacial das médias da métricas fenológica SOS.....	223

Figura 78 -	Distribuição espacial das médias da métricas fenológica POS.....	224
Figura 79 -	Distribuição espacial das médias da métricas fenológica EOS. ....	225
Figura 80 -	Distribuição espacial das médias da métricas fenológica LOS. ....	226
Figura 81 -	Variação temporal das médias da métricas fenológica SOS.....	228
Figura 82 -	Variação temporal das médias da métricas fenológica EOS. ....	229
Figura 83 -	Variação temporal das médias da métricas fenológica POS.....	231
Figura 84 -	Variação temporal das médias da métricas fenológica LOS. ....	232
Figura 85 -	Variação temporal das curvas fenológicas da área de estudo .....	234
Figura 86 -	Curva fenológica da área de estudo no ano de 2024.....	236
Figura 87 -	Dinâmica sazonal da vegetação da Caatinga ao longo dos meses de 2024. ...	237
Figura 88 -	Dinâmica fenológica da Caatinga Arbórea Aberta ao longo de 2024 .....	238
Figura 89 -	Dinâmica sazonal da fenologia em diferentes tipologias de vegetação ao longo dos meses de 2024. ....	239
Figura 90 -	Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto as tipologias da caatinga. ....	240
Figura 91 -	Histogramas circulares das fenofases das tipologias da caatinga da área de estudo de 2016 a 2024 .....	242
Figura 92 -	Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto o estado dinâmico formado por sucessão.....	244
Figura 93 -	Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto o estado dinâmico formado por perturbação.....	246
Figura 94 -	Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto o estado dinâmico estabilizado.....	247
Figura 95 -	Distribuição espacial da média anual da densidade da biomassa acima do solo da caatinga lenhosa. ....	250
Figura 96 -	Distribuição espacial da média anual do estoque do carbono da caatinga lenhosa. ....	251
Figura 97-	Correlação entre densidade de biomassa acima do solo e métricas fenológicas, nas tipologias da caatinga .....	252
Figura 98 -	Serrapilheira e biomassa acumulada no solo durante a fenofases POS e EOS em área de CAA.....	253
Figura 99 -	Correlação entre estoque de carbono e métricas fenológicas, nas tipologias da caatinga .....	254

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Detalhe e dados dos satélites utilizados. ....	55
Quadro 2 -	Classes de uso e cobertura definidas para pesquisa. ....	59
Quadro 3 -	Classificação das classes dinâmicas definidas para pesquisa. ....	61
Quadro 4 -	Síntese das informações levantadas em capo das parcelas amostrais.....	102
Quadro 5 -	Resumo dos estados dinâmicos das tipologias da caatinga da área de estudo .....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classes de vegetação na área de estudo nos anos de 1987, 2005 e 2024.....	66
Tabela 2 -	Precisões da classificação para 1987, 2005 e 2024.....	67
Tabela 3 -	Alteração das classes dinâmicas nos períodos: 1987-2005 e 2005-2024. ....	72
Tabela 4 -	Variação dos valores da cobertura da vegetação lenhosa da caatinga .....	75
Tabela 5 -	dados da distância média entre os fragmentos e da densidade da borda média	82
Tabela 6 -	Classes de tamanhos dos fragmentos da vegetação lenhosa .....	85
Tabela 7 -	Áreas das tipologias da caatinga lenhosa do ano de 2024 .....	102
Tabela 8 -	Áreas das classes tipológicas da caatinga lenhosa no período de 2016-2024.	113
Tabela 9 -	Dinâmicas das tipologias da caatinga lenhosa no período de 2016-2024.....	123
Tabela 10 -	Valores médios do EVI quanto as tipologias.....	140
Tabela 11 -	Estimativas Mann-Kendall e da inclinação de Theil-Sem das tipologias.....	147
Tabela 12 -	Estimativas dos coeficientes de variação das tipologias da caatinga da área de estudo .....	150
Tabela 13 -	Correlações entre as anomalias de EVI e SST, divididas pelos períodos climáticos e sazonalidades .....	163

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Áreas Antropizadas
AD	Caatinga Arbórea Densa
AG	Agropecuária
AGB	Aboveground Biomass (Biomassa Acima do Solo)
ANPP	Aboveground Net Primary Production
AU	Áreas Urbanas e Edificadas
ArA	Caatinga Arbustiva Aberta
ArAA	Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta
BSI	Bare Soil Index (Índice de Solo Exposto)
CAA	Caatinga Arbórea Aberta
CAD	Caatinga Arbórea Densa
CArA	Caatinga Arbustiva Aberta
CArAA	Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station
CL	Caatinga Lenhosa
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CV	Coefficiente de Variação
DOY	Day of Year (Dia do Ano)
ENSO	El Niño–Southern Oscillation
EOS	End of Season (Fim da Estação)
ET	Evapotranspiração
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Food and Agriculture Organization
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation
GEE	Google Earth Engine
GPP	Gross Primary Productivity
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LOS	Length of Season (Duração da Estação)
LSP	Land Surface Phenology (Fenologia da Superfície Terrestre)
LST	Land Surface Temperature (Temperatura da Superfície Terrestre)



LULC	Land Use and Land Cover (Uso e Cobertura da Terra)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	MultiSpectral Instrument
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPP	Net Primary Productivity (Produtividade Primária Líquida)
POS	Peak of Season (Pico da Estação)
RUE	Rain Use Efficiency (Eficiência do Uso da Chuva)
SAR	Synthetic Aperture Radar
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SG	Savitzky-Golay
SOS	Start of Season
SSM	Soil Surface Moisture (Umidade do Solo Superficial)
SST	Sea Surface Temperature
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TWI	Topographic Wetness Index
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	<b>22</b>
1.1	INTRODUÇÃO GERAL .....	22
1.2	JUSTIFICATIVA.....	23
1.3	OBJETIVOS.....	24
1.4	ESTRUTURA DA TESE .....	24
1.5	ÁREA DE ESTUDO .....	25
<b>2</b>	<b>HISTÓRIA E APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO NA CAATINGA: AVANÇOS METODOLÓGICOS E ANÁLISES DA VEGETAÇÃO</b> .....	<b>29</b>
2.1	EVOLUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DAS TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA .....	31
2.1.1	<b>Período Pioneiro (1980-1990): Projeto RADAMBRASIL e os Levantamentos Iniciais da Vegetação</b> .....	<b>32</b>
2.1.2	<b>Consolidação do Uso de Satélites (1990-2000): Expansão do Mapeamento e Monitoramento</b> .....	<b>33</b>
2.1.3	<b>Expansão dos Métodos e Novos Sensores (2000-2010): Monitoramento Temporal, Índices de Vegetação e Modelagem Fenológica</b> .....	<b>35</b>
2.1.4	<b>Avanços Recentes e Big Data (2010-presente): Computação em Nuvem, Aprendizado de Máquina e Monitoramento Contínuo</b> .....	<b>36</b>
2.2	MÉTODOS E APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DA VEGETAÇÃO.....	38
2.2.1	<b>Índices Espectrais e Monitoramento da Vegetação</b> .....	<b>41</b>
2.2.2	<b>Mudanças Climáticas, Desertificação e Impactos Ambientais</b> .....	<b>43</b>
2.2.3	<b>Dinâmica da Vegetação, Produtividade Primária e Fenologia</b> .....	<b>45</b>
2.2.4	<b>Hidrologia, Evapotranspiração e Balanço Energético</b> .....	<b>47</b>
2.2.5	<b>Modelagem Ambiental e Avanços Recentes</b> .....	<b>49</b>
<b>3</b>	<b>IMPACTO DE PERTURBAÇÕES ANTROPOGÊNICAS CRÔNICAS NA DINÂMICA VEGETACIONAL DA CAATINGA</b> .....	<b>52</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	52
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	54
3.2.1	<b>Aquisição e Pré-processamento dos Dados</b> .....	<b>54</b>
3.2.1.1	Dados de sensoriamento óptico .....	55

3.2.1.2	Plataforma de Processamento.....	55
<b>3.2.2</b>	<b>Método e Análise dos Dados .....</b>	<b>56</b>
3.2.2.1	Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) .....	56
3.2.2.2	Classificação LULC e Mapeamento da cobertura vegetal .....	58
3.2.2.3	Análise de mudança e da dinâmica da vegetação.....	60
3.2.2.4	Avaliação da classificação e precisão .....	61
3.2.2.5	Extração da vegetação da caatinga lenhosa do recorte temporal da pesquisa.....	62
3.2.2.6	Aplicação das Métricas da Paisagem .....	63
3.3	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS PADRÕES DE MUDANÇA DO USO E COBERTURA DA TERRA.....	65
3.4	CARACTERIZAÇÃO DAS DINÂMICAS DA VEGETAÇÃO E DA ESTRUTURA DA PAISAGEM.....	68
3.5	AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA CAATINGA LENHOSA NO RECORTE TEMPORAL DA PESQUISA.....	73
3.6	PADRÕES ESPACIAIS DE FRAGMENTAÇÃO DA VEGETAÇÃO LENHOSA	76
<b>3.6.1</b>	<b>Perturbações Antrópicas e Seus Efeitos na Fragmentação da Paisagem.....</b>	<b>77</b>
3.6.1.1	Principais Causas de Perturbações Antrópicas.....	77
<b>3.6.2</b>	<b>Avaliação da Fragmentação da Vegetação Lenhosa com Base em Métricas da Paisagem.....</b>	<b>79</b>
3.7	CONCLUSÃO.....	86
<b>4</b>	<b>DIFERENCIAÇÃO DE FORMAÇÕES DE CAATINGA E ESTADOS DINÂMICOS DA VEGETAÇÃO.....</b>	<b>88</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	88
4.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	90
<b>4.2.1</b>	<b>Aquisição de Dados e Pré-Processamento .....</b>	<b>91</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Método e Análise Dos Dados .....</b>	<b>92</b>
4.2.2.1	Modelagem da Estrutura da Vegetação.....	92
4.2.2.2	Método de Classificação tipológica da caatinga lenhosa .....	95
4.3	CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS TIPOLOGIAS DA VEGETAÇÃO LENHOSA DA CAATINGA.....	99
4.4	AVALIAÇÃO DINÂMICAS DAS TIPOLOGIAS .....	111
4.5	ESTADOS DINÂMICOS DAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA.....	117
4.6	CONCLUSÃO.....	125

<b>5</b>	<b>RELAÇÕES ENTRE O ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO EM DIFERENTES FORMAÇÕES E ESTÁGIOS SUCESSIONAIS DE CAATINGA .....</b>	<b>127</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	127
5.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	129
<b>5.2.1</b>	<b>Aquisição de Dados e Pré-Processamento.....</b>	<b>129</b>
5.2.1.1	Dados do índice de vegetação .....	130
5.2.1.2	Dados climáticos .....	130
5.2.1.3	Dados Climáticos Globais .....	131
5.2.1.4	Plataforma de Processamento.....	131
5.2.1.5	Integração com dados dos capítulos anteriores: .....	132
<b>5.2.2</b>	<b>Método e Análise dos Dados .....</b>	<b>132</b>
5.2.2.1	Análise de tendências de Mann-Kendall da vegetação .....	132
5.2.2.2	Estimador de Inclinação de Sem .....	134
5.2.2.3	Coefficiente de Variação do EVI.....	135
5.2.2.4	Análise de correlação parcial .....	136
5.3	PADRÕES ESPACIAIS DO INDICE DE VEGETAÇÃO .....	137
<b>5.3.1</b>	<b>Padrões do EVI em diferentes tipologias e estados dinâmicos.....</b>	<b>140</b>
5.4	TENDÊNCIAS E VARIAÇÕES DO EVI NA VEGETAÇÃO .....	143
<b>5.4.1</b>	<b>Análise conjunta das tendências em diferentes tipologias e estados dinâmicos</b>	<b>146</b>
5.5	VARIABILIDADE DAS MUDANÇAS DO EVI .....	148
<b>5.5.1</b>	<b>Análise do CV em diferentes tipologias e estados dinâmicos .....</b>	<b>150</b>
5.6	RESPOSTA ESPACIAL DO EVI AOS FATORES CLIMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO .....	152
<b>5.6.1</b>	<b>Correlação linear do EVI e a precipitação.....</b>	<b>156</b>
<b>5.6.2</b>	<b>Padrões de resposta da vegetação ao ENSO .....</b>	<b>160</b>
5.7	CONCLUSÃO.....	164
<b>6</b>	<b>DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO SOLO E RESPOSTA DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES FORMAÇÕES E ESTÁGIOS SUCESSIONAIS DE CAATINGA .....</b>	<b>166</b>
6.1	INTRODUÇÃO.....	166
6.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	168
<b>6.2.1</b>	<b>Aquisição e Pré-processamento dos Dados .....</b>	<b>168</b>

6.2.1.1	Dados de sensoriamento óptico .....	168
6.2.1.2	Dados térmicos e temperatura da superfície.....	169
6.2.1.3	Dados topográficos:.....	169
6.2.1.4	Dados climáticos: .....	169
6.2.1.5	Integração com dados dos capítulos anteriores: .....	170
<b>6.2.2</b>	<b>Método e Análise dos Dados</b> .....	<b>170</b>
6.2.2.1	Eficiência do Uso Da Chuva (RUE).....	170
6.2.2.2	Evapotranspiração (ET).....	172
6.2.2.3	Umidade Superficial do Solo (SSM).....	174
6.2.2.4	Temperatura a Superfície Terrestre (LST) .....	176
6.2.2.5	Índice de Umidade Topográfica (TWI).....	179
6.3	VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DA CHUVA (RUE) NAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA SOB INFLUÊNCIA ANTRÓPICA.....	180
6.3.1	Análise da RUE por meio do coeficiente de variação nas tipologias da caatinga....	185
6.4	PADRÕES DE REPOSTAS ENTRE EFICIÊNCIA DO USO DA CHUVA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NOS DISTÚRBIOS HÍDRICOS NAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA .....	187
6.5	PADRÕES ESPACIAIS DA UMIDADE SUPERFICIAL DO SOLO (SSM) COMO VARIÁVEL DE SUPORTE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA CAATINGA .....	192
6.6	DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (LST) E SUA RELAÇÃO COM EFICIENCIA HÍDRICA DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA .....	197
6.7	DINÂMICAS DAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA EM RESPOSTA ÀS VARIÁVEIS DE PRODUTIVIDADE HÍDRICA.....	202
6.8	PADRÕES ESPACIAIS DO ÍNDICE DE UMIDADE TOPOGRÁFICA (TWI) E SUA REALAÇÃO INDICATIVA DE ESTABILIDADE DAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA .....	206
<b>6.8.1</b>	<b>Análise do TWI na Persistência de Tipológicas na Vegetação da Caatinga</b> ....	<b>207</b>
6.9	CONCLUSÃO.....	209
<b>7</b>	<b>DINÂMICA DA FENOLOGIA E SUA RESPOSTA ÀS PERTURBAÇÕES ANTRÓPICAS NA CAATINGA</b> .....	<b>211</b>
7.1	INTRODUÇÃO.....	211
7.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	213
<b>7.2.1</b>	<b>Aquisição de Dados e Pré-Processamento</b> .....	<b>213</b>
7.2.1.1	Dados da Fenologia da Vegetação .....	213

7.2.1.2	Dados dos Fatores Ambientais (Armazenamento do Carbono e Densidade da Biomassa).....	214
7.2.1.3	Integração com dados dos capítulos anteriores:.....	214
<b>7.2.2</b>	<b>Método e Análise Dos Dados</b> .....	<b>215</b>
7.2.2.1	Modelo de detecção de Fenologia da Superfície Terrestre (LSP).....	215
7.2.2.2	Fatores ambientais.....	219
7.3	PADRÕES ESPACIAIS DA FENOLOGIA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE (LSP) 222	
<b>7.3.1</b>	<b>Distribuição espacial das métricas fenológicas</b> .....	<b>227</b>
7.4	VARIABILIDADE INTERANUAL DAS MÉTRICAS FENOLÓGICAS.....	233
7.5	DINÂMICA SAZONAL DAS MÉTRICAS FENOLÓGICAS EM DIFERENTES TIPOLOGIAS .....	240
7.6	IMPACTO DAS PERTURBAÇÕES ANTRÓPICAS NOS ESTADOS DINÂMICOS NA CAATINGA .....	243
<b>7.6.1</b>	<b>Estado de Sucessão</b> .....	<b>244</b>
<b>7.6.2</b>	<b>Estado de Perturbação</b> .....	<b>245</b>
<b>7.6.3</b>	<b>Estado Estabilizado</b> .....	<b>247</b>
7.7	RESPOSTAS DE FATORES AMBIENTAIS NA LSP .....	248
7.8	CONCLUSÃO.....	255
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>256</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>259</b>
	<b>APÊNDICE A - MAPAS TEMÁTICOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MUNICÍPIO DE PÃO DE AÇÚCAR</b> .....	<b>300</b>
	<b>APÊNDICE B - AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE REGRESSÃO ESTRUTURAL E BIOFÍSICA</b> .....	<b>303</b>
	<b>APÊNDICE C - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO LENHOSA</b> .....	<b>308</b>
	<b>APÊNDICE D - PLATAFORMAS INTERATIVAS PARA ANÁLISE E MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA</b> .....	<b>310</b>

# 1 APRESENTAÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO GERAL

O sensoriamento remoto se consolidou nas últimas décadas como uma ferramenta fundamental para o estudo da dinâmica ambiental e da cobertura vegetal, permitindo o monitoramento em larga escala e a análise de mudanças ao longo do tempo (Rêgo et al., 2012; Oliveira et al., 2017; Jensen, 2011). Seu avanço tecnológico, aliado à crescente disponibilidade de imagens orbitais, tem promovido a melhoria da capacidade de detecção, avaliação e previsão de alterações ambientais, sendo essencial para a compreensão dos processos ecológicos em diferentes biomas e regiões do globo (Ponzoni e Shimabukuro, 2010; Asner, 1998).

As aplicações do sensoriamento remoto abrangem uma ampla gama de investigações, como o monitoramento de padrões de vegetação, o estudo de atributos biofísicos e bioquímicos da superfície terrestre e a avaliação da cobertura do solo (Asner, 1998; Bastiaanssen et al., 2005). Essas tecnologias oferecem suporte para o planejamento ambiental e para a tomada de decisão em políticas públicas, particularmente no que se refere à gestão dos recursos naturais (Bastiaanssen et al., 2010; Giongo e Vettorazzi, 2014).

Com o surgimento de novas tecnologias de sensoriamento remoto, notadamente aquelas baseadas em plataformas orbitais e computação em nuvem, inaugurou-se um novo paradigma para o monitoramento ambiental, caracterizado por maior transparência, precisão e capacidade de resposta em tempo real (Searcy et al., 2022; Reid, 2023). Essa transformação tecnológica amplia as possibilidades de construção de sistemas de monitoramento "democráticos" e colaborativos, essenciais para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas, a perda da biodiversidade e a degradação dos recursos naturais (Skidmore et al., 2021; Reid, 2023).

No contexto do semiárido brasileiro, destaca-se a importância do sensoriamento remoto para a compreensão da dinâmica da Caatinga, um ecossistema de vegetação adaptada às condições de elevada variabilidade sazonal na disponibilidade de água (Ganem et al., 2020; Sperle da Silva, 2018). O monitoramento remoto da Caatinga apresenta desafios particulares devido à forte variação fenológica da vegetação, especialmente nos períodos de seca, quando a similaridade espectral entre o solo exposto e a vegetação caducifólia dificulta a distinção de padrões (Ponzoni et al., 2015; Sperle da Silva, 2023). Ainda assim, os avanços metodológicos recentes, como a integração de diferentes sensores e técnicas de análise multitemporal, têm

ampliado a capacidade de caracterizar os processos ecológicos e as alterações provocadas por fatores naturais e antrópicos.

As perturbações antrópicas crônicas, resultantes do uso intensivo dos recursos naturais, da expansão agropecuária e da extração de madeira, têm transformado de maneira persistente a estrutura da vegetação da Caatinga, promovendo a fragmentação da paisagem, a perda de conectividade ecológica e a degradação da biodiversidade (Antongiovanni et al., 2020; Oliveira, 2017; Melo, 2017). Nesse cenário, o sensoriamento remoto emerge como uma ferramenta essencial para identificar alterações na configuração da vegetação, monitorar processos de degradação e embasar estratégias de conservação e manejo sustentável, ampliando a capacidade de detecção de padrões ecológicos e de avaliação dos impactos ambientais em larga escala (Jesus et al., 2021; Souza Junior et al., 2022; Cavalcanti et al., 2022).

Além disso, as perturbações antrópicas reconfiguram a estrutura da paisagem e impactam diretamente os estágios sucessionais da vegetação da Caatinga, dificultando a progressão natural para estados de maior complexidade ecológica. As atividades humanas recorrentes, como o sobrepastoreio, a extração seletiva de madeira e o uso inadequado do solo, favorecem o surgimento e a persistência de formações vegetacionais mais abertas e degradadas, imitando o avanço sucessional (Medeiros et al., 2022; Borges et al., 2022). Como consequência, a paisagem passa a ser dominada por mosaicos em diferentes estágios de perturbação e recuperação, cuja configuração estrutural pode ser monitorada por séries temporais de dados orbitais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do cenário delineado, evidencia-se a necessidade de aprofundar o entendimento sobre as consequências das perturbações antrópicas na dinâmica espacial e sucessional da vegetação lenhosa da Caatinga. Embora o sensoriamento remoto tenha ampliado o monitoramento da cobertura vegetal, ainda são escassos os estudos que integram séries temporais orbitais à análise dos estágios sucessionais e dos processos de degradação.

A heterogeneidade da Caatinga, acentuada pelas pressões humanas, resultou na formação de mosaicos de vegetação em diferentes estágios de perturbação e recuperação. Compreender essa dinâmica é fundamental para interpretar os padrões ecológicos atuais e projetar trajetórias futuras de regeneração ou degradação. A integração de dados orbitais com modelos ecológicos são estratégias para identificar áreas críticas, inferir processos sucessionais interrompidos e detectar sinais de resiliência em meio às pressões ambientais.



Assim, ao integrar na pesquisa análise da fragmentação, os efeitos das perturbações nos estágios sucessionais, a caracterização dos estados dinâmicos da vegetação lenhosa da Caatinga se torna fundamental para subsidiar estratégias de conservação e restauração ecológica. Nesse contexto, o uso do sensoriamento remoto, ao possibilitar o monitoramento contínuo e espacialmente direto desses processos, configura-se como uma ferramenta importante para compreensão dos padrões de degradação e das dinâmicas de recuperação ecológica.

### 1.3 OBJETIVOS

Dessa forma, a tese tem como objetivo central analisar a dinâmica estrutural e funcional da vegetação lenhosa da Caatinga, considerando suas diferentes tipologias e os efeitos das perturbações antrópicas crônicas e das variações ambientais, com ênfase nos processos de fragmentação, sucessão ecológica e transição entre estados dinâmicos da vegetação.

Os objetivos específicos incluem: (I) mapear e analisar as mudanças na cobertura da vegetação lenhosa da Caatinga ao longo do tempo; (II) avaliar os efeitos da estrutura da paisagem na fragmentação espacial e na conectividade ecológica dos remanescentes de vegetação; (III) investigar os processos sucessionais e as transições tipológicas da vegetação sob a influência das perturbações antrópicas; (IV) correlacionar os padrões de precipitação com a produtividade da vegetação lenhosa em diferentes tipologias e estágios sucessionais; (V) analisar a eficiência hídrica da vegetação por meio de métricas derivadas de sensoriamento remoto; e (VI) compreender a dinâmica fenológica da vegetação lenhosa e sua modulação por fatores ambientais e antrópicos.

### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Para dar conta da complexidade da temática proposta, a presente tese foi estruturada de forma a integrar diferentes escalas e abordagens analíticas, onde os capítulos foram organizados de maneira complementar e inter-relacionada. Cada capítulo apresenta estrutura própria de introdução, metodologia, resultados e discussões, o que permite aprofundamentos específicos sem comprometer a coesão e a continuidade do conjunto.

O **Capítulo 2** apresenta o referencial teórico, com ênfase na evolução do sensoriamento remoto aplicado à vegetação da Caatinga, destacando seus avanços, limitações e aplicações mais recentes. O **Capítulo 3** analisa os padrões de mudança da vegetação lenhosa com base em séries históricas orbitais e métricas de ecologia da paisagem, evidenciando como a estrutura

espacial influencia os processos de fragmentação. Em continuidade, o **Capítulo 4** investiga os processos dinâmicos das formações vegetacionais a partir de uma perspectiva geossistêmica, associando os conceitos de sucessão ecológica e estados dinâmicos às tipologias estruturais da Caatinga. O **Capítulo 5** examina as relações entre a produtividade da vegetação e a precipitação, por meio da aplicação do índice EVI, buscando compreender as respostas espaciais e temporais das formações lenhosas à variabilidade hídrica. O **Capítulo 6** aprofunda a análise da disponibilidade hídrica no solo e da resposta ecofisiológica da vegetação, integrando variáveis como RUE, evapotranspiração e umidade do solo. Por fim, o **Capítulo 7** trata da dinâmica fenológica da Caatinga com base no modelo da Fenologia da Superfície Terrestre (LSP), avaliando como os padrões sazonais são influenciados por distúrbios antrópicos e fatores ambientais.

## 1.5 ÁREA DE ESTUDO

Nesse cenário, a escolha de uma área representativa se torna essencial para avaliar, de maneira integrada, as interações entre fatores naturais e antrópicos que moldam a dinâmica da vegetação da Caatinga. O município de Pão de Açúcar, localizado no estado de Alagoas, foi selecionado por representar bem as dinâmicas ecológicas e sociais típicas da região semiárida do Nordeste do Brasil. Situado na mesorregião do Sertão Alagoano, na área do baixo São Francisco, Pão de Açúcar se encontra entre as coordenadas geográficas 9°29'59.77" e 9°52'7.17" de latitude sul e 37°40'46.01" e 37°14'51.07" de longitude oeste (Datum SIRGAS2000), fazendo fronteira com os municípios de Palestina e Belo Monte a leste, São José da Tapera e Monteirópolis ao norte, Piranhas a oeste, e Poço Redondo e Porto da Folha ao sul, estes últimos no estado de Sergipe (**Figura 1**).

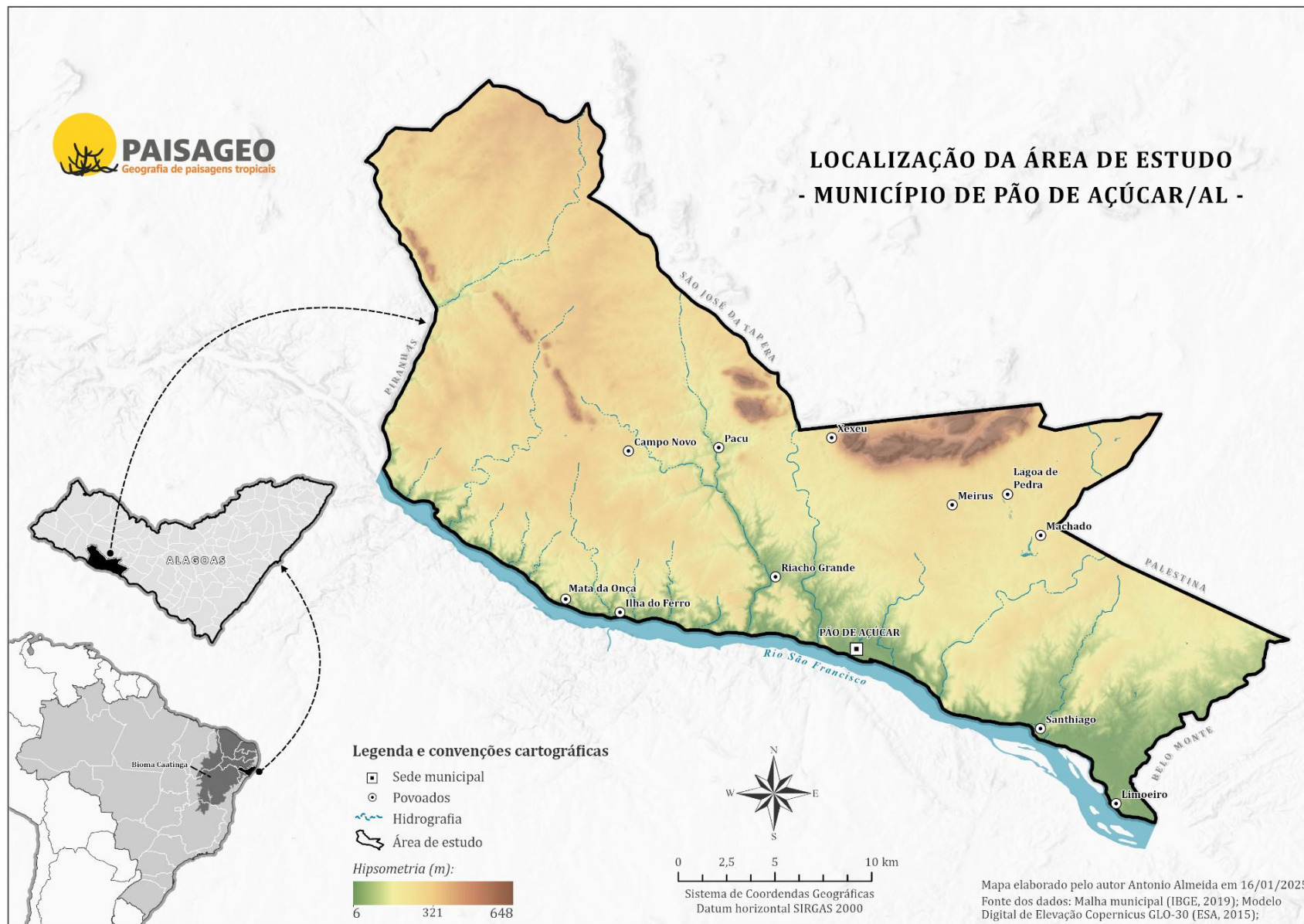
O município apresenta uma área territorial de 688,87 km<sup>2</sup> e uma população estimada em 23.823 habitantes (IBGE, 2022). O clima da região é classificado como Tropical Semiárido Quente (BSh), conforme Köppen e Geiger (1928), caracterizado por precipitações irregulares e mal distribuídas, com totais anuais variando entre 500 e 600 mm (Barros, 2012). A estação seca se prolonga por mais de sete meses, concentrando-se as chuvas entre abril e julho, com picos de precipitação no mês de junho (INMET, 2022). As temperaturas médias anuais oscilam em torno de 27 °C, com pouca variação ao longo do ano, sendo dezembro o mês mais quente e julho o mais ameno.

Do ponto de vista geológico, Pão de Açúcar se encontra sobre embasamento cristalino do Pré-Cambriano do Terreno Pernambuco–Alagoas, composto por rochas magmáticas-

crystalinas pertencentes ao domínio dos complexos granitoides deformados. Essas unidades geológicas, datadas do Neoproterozoico, incluem uma sucessão de corpos granitoides resultantes de múltiplos pulsos magmáticos, individualizados em suítes pré-, sin-, tardi- e pós-orogênicas, associados aos eventos de retrabalhamento tectono-termal da Província Borborema (CPRM, 2017). A distribuição espacial dessas unidades pode ser visualizada no **Mapa A.1, apresentado no Apêndice A.**

O relevo do município se insere no domínio geomorfológico da Depressão do Baixo Rio São Francisco (CPRM, 2017), caracterizado por processos de pediplanação, que originaram superfícies suavemente inclinadas no sentido Norte-Sul, além de áreas de relevo suave ondulado e superfícies aplainadas. Inseridos nesse contexto, destacam-se os relevos residuais, formados por testemunhos de rochas mais resistentes à erosão, configurando perfis íngremes e rochosos (Jacomine et al., 1975). Entre esses relevos residuais, são comuns os inselbergs e as serras residuais, que se sobressaem na paisagem monótona das superfícies aplainadas, conferindo ao território amplitudes altimétricas mais expressivas. As principais feições geomorfológicas do município estão representadas no **Mapa A.2, disponível no Apêndice A.**

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor

Os solos predominantes no município são classificados como Planossolos Háplicos, caracterizados por serem solos minerais imperfeitamente drenados, com alta atividade de argila e ocorrência em ambientes com restrição de drenagem. Em seguida, destacam-se os Neossolos Litólicos, solos rasos, frequentemente associados a áreas com alta pedregosidade e rochiosidade. Também são encontrados Neossolos Regolíticos, de pouca profundidade, geralmente com coloração clara ou esbranquiçada e textura variando de arenosa a franco-arenosa. Além desses, ocorrem ainda Luvisolos Crômicos e Neossolos Flúvicos, associados a áreas de deposição sedimentar ao longo dos cursos d'água (EMBRAPA, 2012). A distribuição desses solos no território municipal pode ser consultada no **Mapa A.3, apresentado no Apêndice A.**

A rede de drenagem do município é formada por afluentes intermitentes das bacias hidrográficas dos riachos Capiá, Grande, Boqueirão, Jacaré e Farias, que convergem para o Rio São Francisco. Esses cursos d'água apresentam caráter predominantemente temporário, com maiores volumes de água concentrados durante a estação chuvosa, entre abril e julho, com pico em junho. No restante do ano, a maioria dos leitos apresenta reduzido volume hídrico ou permanece completamente seca, refletindo o regime climático semiárido da região (Barros, 2012).

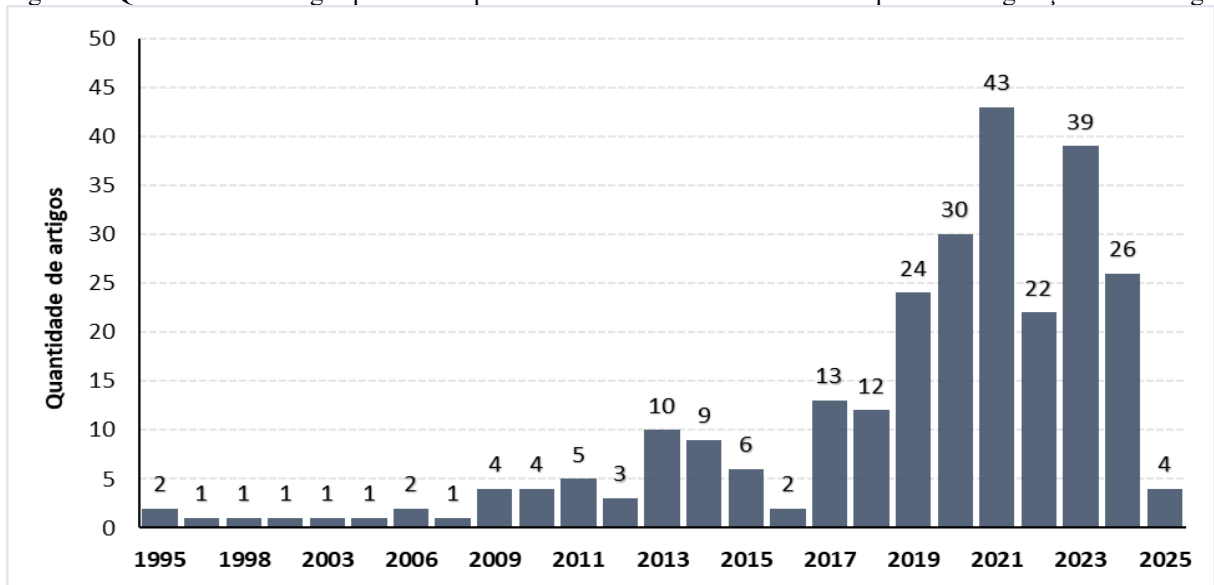
A cobertura vegetal original do município é caracterizada principalmente por formações de Caatinga Hiperxerófila, apresentando elevado grau de adaptação às condições de déficit hídrico extremo, como a caducifolia sazonal e a presença de espécies altamente xeromórficas (Jacomine et al., 1975; Ab'saber, 2003). Essas formações incluem desde tipologias de vegetação arbórea densa até arbustivas abertas. Essa diversidade fisionômica associada a um histórico pressão antrópica, torna a área de estudo um espaço ideal para o monitoramento multitemporal das mudanças na vegetação e a avaliação dos efeitos das perturbações ambientais sobre os processos ecológicos e sucessão das formações da Caatinga.

## 2 HISTÓRIA E APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO NA CAATINGA: AVANÇOS METODOLÓGICOS E ANÁLISES DA VEGETAÇÃO

O sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o estudo da vegetação, permitindo análises multiescalares da dinâmica ambiental do ecossistema da Caatinga. Porém, a produção científica sobre o tema ainda apresenta lacunas significativas quando comparada a outros biomas brasileiros. Uma consulta recente, abril de 2025, nas principais bases de dados científicos revelou um total de 395 artigos, que após a remoção de duplicatas constatou 266 artigos sobre sensoriamento remoto a Caatinga, distribuídos entre as plataformas Scopus (151), Web of Science (147), Science Direto (73) e Scielo (24).

A progressão histórica das publicações indica que, até o início da década de 2000, a quantidade de pesquisas se manteve escassa. Apenas a partir de 2010 foi notado um nível mais estável na produção científica, atingindo uma média anual de 16 artigos (**Figura 2**). Este progresso pode estar ligado ao avanço tecnológico dos sensores remotos, ao aumento da disponibilidade de imagens orbitais e ao crescente aumento do interesse em estudos ambientais sobre a temática. Contudo, as informações não apontam para um aumento expressivo na produção científica, nem uma tendência de expansão constante, indicando que a Caatinga ainda recebe menos atenção no âmbito do sensoriamento remoto em relação a outros biomas do Brasil.

Figura 2 - Quantidade de artigos publicados por ano sobre sensoriamento remoto aplicado à vegetação da Caatinga



Fonte: plataformas Scopus, Web of Science, Science Direct e Scielo. Elaboração do autor

Uma análise específica na plataforma Web of Science revelou a existência de 147 artigos científicos publicados sobre o uso do sensoriamento remoto para o estudo da vegetação da Caatinga, um número superior ao do Pantanal (49) e dos Pampas (135), mas significativamente inferior à produção científica voltada para a Amazônia (2.620), a Mata Atlântica (573) e o Cerrado (467). Essa lacuna evidencia a necessidade de ampliar a produção científica e aprimorar as metodologias aplicadas ao sensoriamento remoto na Caatinga, garantindo informações mais detalhadas e precisas sobre a dinâmica e o estado de conservação de sua vegetação (Ganem et al., 2020).

Sua limitação na produção científica, pode estar relacionada aos desafios metodológicos associados ao mapeamento da Caatinga por meio do sensoriamento remoto. A sazonalidade hídrica do bioma impõe desafios significativos, uma vez que a vegetação caducifólia perde grande parte de suas folhas durante os períodos secos, alterando drasticamente sua resposta espectral. Em épocas de estiagem, a ausência de folhas reduz a absorção na faixa do visível e a reflexão no infravermelho próximo, tornando a vegetação espectralmente semelhante ao solo exposto e afloramentos rochosos, dificultando a distinção entre áreas vegetadas e não vegetadas (Sperle da Silva, 2018).

Além disso, as características morfológicas das espécies da Caatinga afetam diretamente a resposta espectral da vegetação. Espécies com folhas curtas, coriáceas ou cobertas por uma cutícula podem interferir na absorção e reflexão da radiação, reduzindo a resposta espectral típica de uma vegetação saudável (Ponzoni et al., 2015). Igualmente, espécies com maior quantidade de espinhos e caule fotossintetizante, encontradas na Caatinga, apresentam padrões de refletância diferentes das florestas tropicais úmidas, tornando mais desafiadores o uso de métodos convencionais de classificação das florestas.

Em face desses desafios, a expansão do acesso a imagens de alta resolução e a variedade de sensores remotos expandem as opções de análise, possibilitando um acompanhamento mais minucioso das alterações no crescimento, dos ciclos fenológicos e das respostas da vegetação às alterações ambientais e às pressões humanas.

Nesse contexto, a evolução das técnicas de sensoriamento remoto tem sido essencial para aprimorar a precisão das análises, tema abordado na Seção 2.1 deste referencial, que discute o desenvolvimento dessas tecnologias e sua aplicação na Caatinga. Além disso, as metodologias empregadas para lidar com os desafios desse bioma, desde a integração de diferentes sensores até a modelagem ambiental, são exploradas na Seção 2.2, destacando estratégias para a identificação e o monitoramento da vegetação ao longo do tempo.

## 2.1 EVOLUÇÃO E DESENVOLVIMENTO DAS TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA

O sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado para o estudo da vegetação Caatinga, permitindo análises multitemporais e aprimorando a compreensão sobre sua dinâmica ambiental. No Brasil, a aplicação dessas técnicas teve início na década de 1940, com os primeiros mapeamentos baseados em fotografias aéreas. Posteriormente, entre as décadas de 1970 e 1980, um dos marcos mais significativos nesse avanço foi o Projeto Radambrasil, que mapeou a vegetação em nível nacional utilizando imagens de radar aerotransportado, gerando assim uma referência para estudos ambientais sobre os recursos naturais.

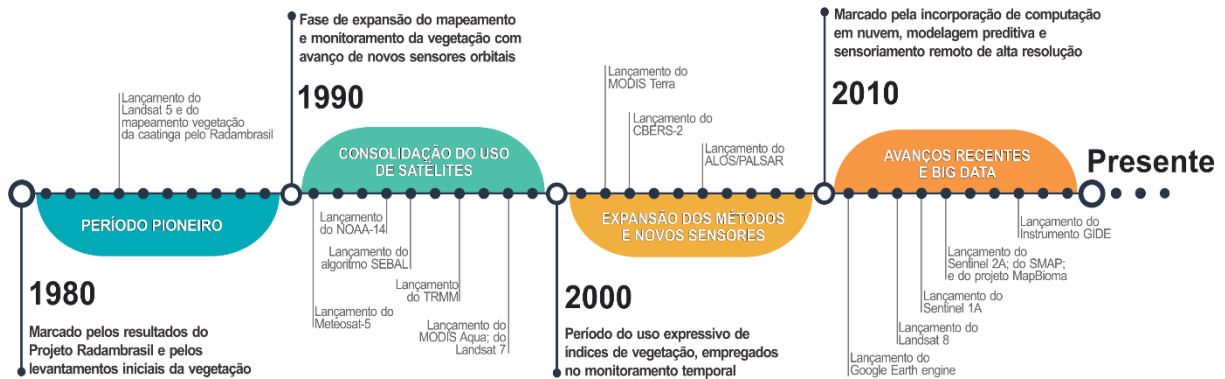
Na década de 1980, com o avanço tecnológico e a disponibilização de sensores orbitais, como a série Landsat, houve uma evolução nos métodos de análise da vegetação, permitindo maior precisão na elaboração de mapas temáticos e na cobertura vegetal. A partir da década de 1990, pesquisas passaram a adotar abordagens quantitativas, correlacionando parâmetros biofísicos com dados radiométricos extraídos de imagens orbitais (Ponzoni et al., 2015).

Na Caatinga, essa evolução pode ser organizada em quatro grandes períodos. (2.1.1) Período Pioneiro (1980-1990), marcado pelos resultados do Projeto Radambrasil e pelos levantamentos iniciais da vegetação, que estabeleceram bases para o uso do sensoriamento remoto no estudo da vegetação do bioma; (2.1.2) Consolidação do Uso de Satélites (1990-2000), fase em que houve uma expansão do mapeamento e monitoramento da vegetação com o avanço de sensores orbitais, como o Landsat, permitindo maior precisão na caracterização das coberturas vegetais; (2.1.3) Expansão dos Métodos e Novos Sensores (2000-2010), período em que o uso de índices espectrais se tornou mais expressivo e sensores como o MODIS passaram a ser usados para uma análise da resposta fenológica da Caatinga e seu monitoramento temporal; e (2.1.4) Avanços Recentes e Big Data (2010-presente), caracterizado pela incorporação de computação em nuvem, modelagem preditiva e sensoriamento remoto de alta resolução, possibilitando um monitoramento contínuo e aprimorado da vegetação, ampliando a capacidade de análise e previsão das mudanças ambientais no bioma.

Para melhor contextualizar a evolução das técnicas de sensoriamento remoto na Caatinga, a figura a seguir apresenta uma linha do tempo destacando os principais marcos e avanços tecnológicos ao longo dos quatro grandes períodos identificados.



Figura 3 - Linha temporal dos principais marcos e avanços técnicos do sensoriamento remoto na vegetação da caatinga



Fonte: O autor

Essa trajetória demonstra como o aprimoramento das técnicas tem permitido análises mais precisas da vegetação, impulsionando pesquisas cada vez mais detalhadas sobre a dinâmica da vegetação, cujos detalhes podem ser vistos nas seções a seguir.

### 2.1.1 Período Pioneiro (1980-1990): Projeto RADAMBRASIL e os Levantamentos Iniciais da Vegetação

O avanço do sensoriamento remoto na Caatinga na década de 1980 foi incentivado pelo Projeto RADAMBRASIL, que representou um dos primeiros esforços sistemáticos para mapear a vegetação, solos e geologia do bioma. O projeto gerou um banco de dados cartográfico que forneceu informações fundamentais para o conhecimento dos recursos naturais da região e estabeleceu as bases para estudos subsequentes (RADAMBRASIL, 1984).

Embora o projeto tenha utilizado predominantemente dados de radar no período de 1975 a 1985 (IBGE, 2018), com a disponibilização das primeiras imagens orbitais do Landsat-3 MSS em 1982, foi possível realizar uma estimativa preliminar da cobertura vegetal da Caatinga, indicando assim um valor aproximado de 65% de cobertura vegetal da Caatinga. Este arcabouço reflete um primeiro uso de imagens de satélite para análise da vegetação da caatinga, consolidando o uso do sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental.

No entanto, a necessidade de uma caracterização mais detalhada da vegetação impulsionou novos estudos que integraram o sensoriamento remoto orbital à análise de campo. Entre esses estudos, Queiroz (1985) que utilizou imagens Landsat-2 MSS para mapear a vegetação e os solos no Vale do Acaraú, Ceará. Integrando levantamentos de campo e análise digital das imagens, o estudo aplicou classificação por máxima verossimilhança e análise de

correspondência destendenciada, demonstrando o potencial do sensoriamento remoto para discriminar padrões vegetacionais e de uso da terra no semiárido.

Carvalho (1986) aprofundou a análise do sensoriamento remoto no monitoramento do ecossistema semiárido na área de Quixabá (PE). Utilizando imagens dos satélites Landsat-1 e Landsat-3 MSS, respectivamente, o autor uniu pesquisas de campo, imagens aéreas e processamento digital de imagens orbitais para examinar a configuração e dinâmica da Caatinga. A pesquisa mostrou que, mesmo com a baixa discriminação espectral das imagens Landsat, elas se mostraram promissoras para o monitoramento da dinâmica do crescimento. Além disso, evidenciou a ampliação das áreas de cultivo no semiárido a partir dos anos 70 e a relevância do sensoriamento remoto na identificação de alterações ambientais.

### **2.1.2 Consolidação do Uso de Satélites (1990-2000): Expansão do Mapeamento e Monitoramento**

A partir dos anos 1990 e 2000, o aprimoramento das imagens orbitais, especialmente dos sensores Landsat SMM/TM, AVHRR/NOAA e Meteosat-5, impulsionou as pesquisas sobre a distribuição espacial da vegetação da Caatinga e sua resposta às variações climáticas e antrópicas. Durante esse período, diversos estudos avançaram na aplicação dessas tecnologias para classificar a vegetação e detectar mudanças ambientais.

As iniciativas iniciais para o mapeamento da vegetação da Caatinga por meio de imagens de satélites foram realizadas por Sá (1991), que empregou dados do Landsat-5 TM em conjunto com fotografias aéreas, adotando uma metodologia em múltiplas inovações para aprimorar a caracterização da vegetação. Em uma pesquisa adicional, Paradella e Vitorello (1995) examinaram a conexão entre o substrato edáfico e a vegetação, empregando imagens do satélite Landsat e do SPOT para identificar correlações entre as categorias de solo e a disposição das fisionomias da Caatinga. Essas pesquisas forneceram dados essenciais sobre os elementos ambientais que influenciam a vegetação na região semiárida.

No contexto fitogeográfico, Nóbrega (1991) investigou o potencial da Caatinga como recurso renovável e os impactos ambientais da conversão da vegetação nativa em áreas agrícolas. Seus resultados evidenciaram que a remoção da cobertura original compromete a biodiversidade e altera o balanço hídrico da região, reforçando a necessidade de estratégias de conservação e manejo sustentável.

A geração e análise de séries temporais de índices espectrais representaram um avanço significativo no monitoramento da vegetação da Caatinga iabilizando a análise de sua

sazonalidade e sua resposta às oscilações climáticas. Vieira (1993) constituiu-se como um dos pioneiros na aplicação do NDVI na localidade, investigando sua relação com variáveis hidrológicas nas bacias hidrográficas cearenses. Sua pesquisa evidenciou que o NDVI pode servir como um indicativo de disponibilidade de água no semiárido, contribuindo para a caracterização dos recursos hídricos.

Kazmierczak (1994, 1996) expandiu o estudo sobre a sazonalidade da vegetação da Caatinga ao examinar a conexão entre NDVI e precipitação. Em seu trabalho de 1994, observou-se a sazonalidade da cobertura vegetal no Ceará, empregando séries temporais de NDVI obtidas do sensor AVHRR/NOAA. Isso mostrou a intensa dependência da vegetação da Caatinga em relação às precipitações. Em 1996, expandiu-se essa metodologia ao estabelecer padrões do NDVI em diversas fisionomias da Caatinga. Os resultados dessas pesquisas destacam a eficácia do sensoriamento remoto como recurso para acompanhar a dinâmica ambiental da Caatinga e entender sua resposta às variações hídricas.

Barbosa (1999) aprofundou a investigação sobre a relação entre o NDVI e a precipitação, utilizando séries temporais do AVHRR/NOAA para avaliar a resposta da vegetação da Caatinga às oscilações pluviométricas. Seu estudo demonstrou que a vegetação apresenta um crescimento acelerado na estação chuvosa e um declínio acentuado na estação seca, evidenciando a estreita relação entre a disponibilidade hídrica e a dinâmica fenológica da Caatinga.

A análise das transformações na cobertura vegetal da Caatinga também ganhou destaque nesse período. Maldonado (1999) aplicou a Análise por Componentes Principais (ACP) para avaliar mudanças no uso da terra em Quixaba, PE. Seu estudo identificou cinco classes de transformação da paisagem, analisando a recuperação e degradação da vegetação. A pesquisa revelou que a conversão da vegetação nativa para usos antrópicos alterava significativamente a dinâmica ecológica da região, impactando a resiliência da Caatinga.

Com foco nos impactos da radiação solar sobre a superfície, Pontes (1997) analisou o balanço de radiação via satélite, comparando estimativas dos satélites Meteosat-5 e NOAA-14 com medições terrestres realizadas na Paraíba. Sua pesquisa revelou que a previsão da temperatura da superfície contribuiu para a caracterização e compreensão do ciclo térmico da Caatinga e seu impacto na vegetação.

### **2.1.3 Expansão dos Métodos e Novos Sensores (2000-2010): Monitoramento Temporal, Índices de Vegetação e Modelagem Fenológica**

A década de 2000, simbolizou um avanço significativo no monitoramento da vegetação da Caatinga, impulsionado pelo progresso de sensores de alta frequência temporal, como o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), além da introdução de novos sensores espaciais, como o CBERS e o Hyperion. A utilização de índices espectrais, especialmente o NDVI, tornou-se essencial para estudos sobre os padrões sazonais da vegetação e sua conexão com as variações climáticas. Além disso, tais imagens possibilitaram análises mais aprofundadas sobre a degradação ambiental, a fragmentação do habitat e as alterações na cobertura do solo, melhorando o entendimento da dinâmica ecológica da Caatinga.

Pesquisadores como Braga (2000) e Neves (2005) expandiram essa perspectiva ao empregar séries temporais de NDVI provenientes do sensor NOAA/AVHRR, oferecendo uma compreensão interanual da variabilidade das coberturas vegetais. As investigações realizadas demonstraram de que maneira diversas fisionomias da Caatinga reagem às oscilações nas precipitações, evidenciando a correlação entre o regime de chuvas e a vegetação presente. Camacho (2001) examinou, por sua vez, a resiliência da vegetação em relação às alterações climáticas e aos impactos humanos na Estação Ecológica do Seridó, RN, ao mesmo tempo em que caracterizou as fisionomias da Caatinga, ofereceu informações fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de conservação.

O mapeamento das fisionomias da Caatinga também avançou significativamente nesse período. Lemos (2006), um dos pioneiros nesse tipo de estudo, utilizou imagens de satélite do CBERS-2 em conjunto com o NDVI para caracterizar a vegetação na Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará. Sua pesquisa permitiu identificar três fisionomias predominantes, contribuindo para uma melhor compreensão da distribuição das comunidades vegetais e auxiliando na previsão de mudanças ambientais na região.

Além de auxiliar na caracterização da vegetação, o sensoriamento remoto vem sendo amplamente utilizadas para analisar a degradação ambiental e os impactos das ações humanas sobre a Caatinga. Freire (2004) e Souza (2008) em seus estudos empregaram imagens Landsat e métodos de classificação supervisionada para detectar processos de desertificação em diversas áreas, no qual destacaram o impacto de elementos climáticos e socioeconômicos. Já Maldonado (2004) desenvolveu uma metodologia com base nas imagens TM/Landsat e técnicas de rotação radiométrica para identificar mudanças na cobertura vegetal, distinguindo estágios da sucessão

ecológica e áreas degradadas, destacando o potencial do sensoriamento remoto no monitoramento ambiental.

O progresso dessas avaliações ambientais possibilitou também a detecção dos efeitos da infraestrutura na fragmentação da Caatinga. Santos e Tabarelli (2002) mostraram que regiões próximas a vias e áreas urbanas apresentavam altas taxas de perda de habitat e isolamento de áreas, destacando a influência direta das ações humanas na degradação florestal.

Simultaneamente, as pesquisas acerca da fenologia da Caatinga progrediram significativamente com a utilização de imagens MODIS. Por exemplo, Formigoni (2008) estudou a dinâmica temporal da vegetação no Nordeste do Brasil por meio do EVI, reconhecendo padrões sazonais variados entre diversas fisionomias da Caatinga e sua conexão com a variabilidade climática.

A integração entre índices espectrais e variáveis eco-hidrológicas foi outro progresso significativo durante esse período, possibilitando análises mais aprofundadas da dinâmica ambiental da Caatinga. Meireles (2007) e Feitosa (2005) comprovaram a eficácia do algoritmo SEBAL na previsão da evapotranspiração real com base em imagens Landsat 5-TM, comprovando sua exatidão em diversas coberturas vegetais. Esta metodologia abriu novas perspectivas para pesquisas acerca do balanço hídrico e do funcionamento dos ecossistemas na área semiárida.

#### **2.1.4. Avanços Recentes e Big Data (2010-presente): Computação em Nuvem, Aprendizado de Máquina e Monitoramento Contínuo**

Desde 2010, o progresso dos sistemas computacionais e o acesso a grandes volumes de dados mudaram o sensoriamento remoto na Caatinga. A crescente acessibilidade ao Big Data, composta por séries temporais de imagens de satélite, informações climáticas e modelos preditivos, tem possibilitado análises mais profundas e abrangentes. A combinação de computação em nuvem e aprendizado de máquina viabilizou a manipulação e análise de extensas bases de dados em larga escala, com destaque para plataformas como o Google Earth Engine (GEE), que possibilita o processamento em massa de padrões espaciais e temporais da vegetação, por meio de imagens provenientes de sensores como Landsat, MODIS e Sentinel-2.

Esse progresso tem sido consolidado por iniciativas como o MapBiomas (2015-atual), que oferece mapeamentos anuais acerca do uso e da cobertura do solo na Caatinga, assegurando elevada precisão na detecção das alterações ambientais. Pesquisas recentes, incluindo as de Melo et al. (2022) e Silva et al. (2022), evidenciam que métodos de sensoriamento remoto

fundamentados no GEE viabilizam análises temporais e espectrais relacionadas a degradação ambiental na Caatinga, contribuindo para a compreensão dos impactos antrópicos sobre a vegetação.

No âmbito do aprendizado de máquina, um dos primeiros trabalhos aplicados ao bioma foi realizado por Sousa (2010), que investigou a classificação de uso e cobertura do solo com base em imagens do Landsat-5 TM, empregando Support Vector Machines (SVM) e Perceptrons de Múltiplas Camadas (MLP). Os resultados mostraram que os algoritmos em questão apresentaram um desempenho superior ao método tradicional da Máxima Verossimilhança, com coeficientes de Exatidão Global superiores a 86%, evidenciando sua eficiência na diferenciação das fitofisionomias da Caatinga.

Desde então, o SVM tem-se afirmado como uma ferramenta eficiente na segmentação espectral da vegetação, expandindo suas aplicações para análises mais aprofundadas. Abade et al. (2015) e Andrade (2021) evidenciaram que o SVM, associado a métricas de distância e similaridade, apresenta elevada precisão na distinção de tipologias vegetacionais na transição entre Cerrado e Caatinga. Além disso, evidenciaram que o uso de séries temporais MODIS é essencial para compreender a dinâmica da vegetação.

Entre os métodos de aprendizado de máquina, o Random Forest (RF) tem se mostrado bastante eficaz na classificação da vegetação e na análise de mudanças no uso da terra. Sob essa perspectiva, Cardoso et al. (2021) aplicaram o RF para mapear a cobertura vegetal da bacia do Rio Taperoá, utilizando imagens Landsat-8 processadas no Google Earth Engine, e obtiveram 79% de acurácia. Já Alba et al. (2022) compararam o desempenho do RF com outros algoritmos, como k-Nearest Neighbor (kNN), SVM e Redes Neurais Artificiais (ANN), no qual constataram que o RF apresentou os melhores resultados na identificação de padrões espaciais da Caatinga. Por sua vez, Moraes (2021) utilizou RF e Árvores de Classificação e Regressão (CART) para analisar mudanças na cobertura do solo em áreas de pecuária, mostrando que esses métodos são eficazes para identificar regiões mais suscetíveis à degradação.

O uso de redes neurais artificiais (ANN) na modelagem preditiva da cobertura da terra também progrediu durante esse período. Silva et al. (2020) elaboraram um modelo de Rede Neural Artificial (ANN) com o propósito de antecipar transformações na vegetação de uma bacia hidrográfica situada na região semiárida, enfatizando sua aptidão para reconhecer padrões espaciais e prever cenários futuros de degradação. Silva, Souza e Bacani (2019) utilizaram ANN e SVM para o mapeamento de ecótonos na Caatinga, alcançando elevados níveis de acurácia e desempenho estatístico.

Um dos avanços significativos desse período foi o uso de LiDAR para caracterizar a estrutura da vegetação e quantificar biomassa da vegetação da caatinga. Gomes (2017) realizou um estudo pioneiro no uso dessa tecnologia na Caatinga, utilizando dados do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) para estimar altura das árvores e biomassa lenhosa. Os resultados indicaram uma forte correlação (0,93) entre os dados LiDAR e medições de campo, evidenciando seu potencial para o monitoramento da vegetação de forma não destrutiva.

Pesquisas subsequentes ampliaram a aplicação do LiDAR, incorporando dados de radar, o que expandiu as oportunidades para o monitoramento da estrutura da vegetação. Silveira et al. (2018) integrou imagens MSI/Sentinel-2 e LiDAR aerotransportado para realizar o mapeamento de atributos físico-químicos do solo, enquanto Oliveira (2019) analisou a comparação entre a estimativa de biomassa e carbono obtida por meio de um inventário florestal convencional e dados LiDAR em florestas secas situadas na região Nordeste. Recentemente, Jesus et al. (2022) utilizaram a decomposição polarimétrica dual do Sentinel-1 para estimar os estoques de biomassa em diferentes fases fenológicas, reforçando a aplicação do radar na análise da dinâmica da Caatinga.

No âmbito da fenologia, a utilização do sensoriamento remoto proporcionou progressos notáveis. Medeiros et al. (2022) realizaram uma análise de séries temporais do NDVI e EVI, estabelecendo correlações com fatores ambientais e contribuindo para previsões acerca da reação da vegetação às oscilações hídricas. Paloschi (2020) analisou a sazonalidade da disponibilidade hídrica e sua ligação com a fenologia da Caatinga, empregando índices espectrais como NDVI, SAVI e GCC provenientes dos dados do Sentinel-2 e do MODIS, evidenciando uma forte correlação com a umidade do solo.

## 2.2 MÉTODOS E APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DA VEGETAÇÃO

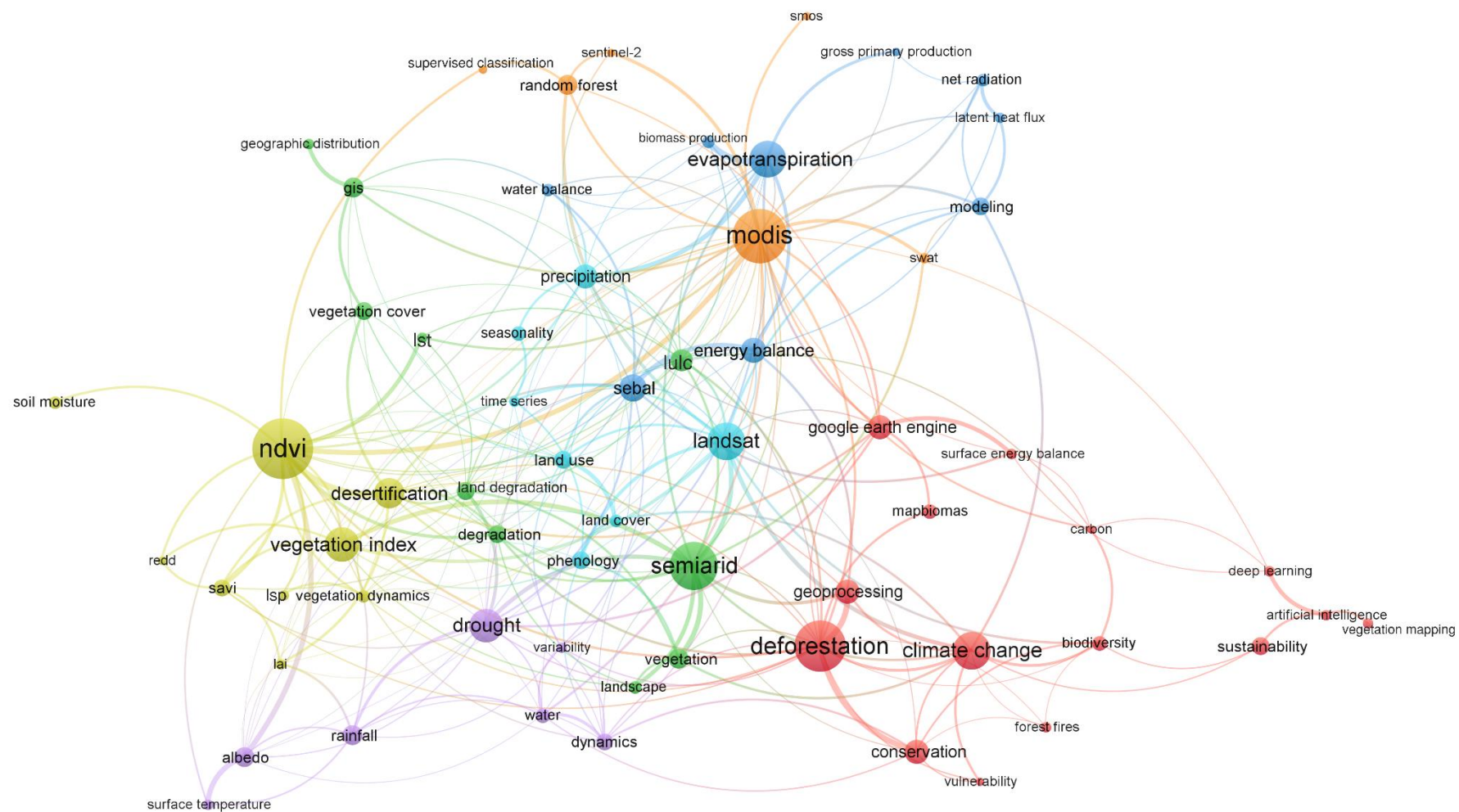
O progresso das tecnologias de sensoriamento remoto tem possibilitado uma compreensão mais detalhada da dinâmica da vegetação da Caatinga, permitindo a adoção de diversas metodologias para o monitoramento ambiental. A ampliação da disponibilidade a imagens de satélite, em conjunto com o avanço de metodologias de modelagem e de processamento em nuvem, tem possibilitado a realização de análises multiescalares que permitem a detecção de padrões sazonais, a mensuração da degradação da vegetação e a previsão de impactos climáticos.

Embora tenha havido progressos nesse campo, a produção científica referente ao tema ainda demonstra lacunas consideráveis em comparação a outros biomas do Brasil, ressaltando a necessidade de uma sistematização do conhecimento disponível. Assim, a fim de entender a evolução das pesquisas acerca do sensoriamento remoto aplicado à Caatinga e reconhecer as metodologias predominantes, foi efetuada uma análise bibliométrica extensiva, levando em conta o total de 266 artigos disponíveis nas principais bases de dados científicas.

A partir dessa revisão, foi elaborado um mapa de palavras-chave (**Figura 4**), construído a partir da análise de títulos, resumos e palavras-chave dos artigos disponíveis. Esse mapeamento revelou as técnicas mais recorrentes e as conexões metodológicas entre diferentes abordagens, permitindo a organização dos estudos em clusters temáticos na aplicação do sensoriamento remoto à vegetação da Caatinga.



Figura 4 - Mapa das técnicas mais recorrentes da aplicação do sensoriamento remoto na vegetação da Caatinga.



Fonte: plataformas Scopus, Web of Science, Science Direct e Scielo. Elaboração do autor

Os padrões observados nessa análise, quanto conceitos e técnicas observadas, permitiram estruturar a literatura científica em cinco grandes eixos temáticos: (2.2.1) índices espectrais no monitoramento da vegetação, destacando métricas como NDVI para a análise da cobertura vegetal e da resposta da Caatinga à variabilidade climática; (2.2.2) Mudanças climáticas, a desertificação e os impactos ambientais, explorando como a degradação da vegetação e a conversão do uso da terra influenciam a resiliência da vegetação. (2.2.3) dinâmica da vegetação, produtividade primária e fenologia, com ênfase nas interações entre precipitação, sazonalidade e produtividade da vegetação. (2.2.4) hidrologia, a evapotranspiração e o balanço energético, aspectos fundamentais para compreender a disponibilidade hídrica e a eficiência do uso da água pela vegetação; e (2.2.5) modelagem ambiental e avanços recentes, destacando o uso de aprendizado de máquina, geoprocessamento em nuvem e integração de múltiplos sensores para o aprimoramento das análises ambientais. Os detalhes de cada um desses eixos são aprofundados nas seções a seguir.

### **2.2.1 Índices Espectrais e Monitoramento da Vegetação**

Os índices espectrais de vegetação desempenham um papel importante no monitoramento da Caatinga. Dentre os mais utilizados estão o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI), amplamente trabalhados na avaliação da dinâmica da vegetação ao longo do tempo e em diferentes escalas espaciais. Essas métricas são fundamentais, ao ajudarem entender a resposta da vegetação à variabilidade climática, típicas do semiárido, e às pressões ambientais que esse ecossistema enfrenta.

As pesquisas iniciais que utilizaram sensoriamento remoto na Caatinga focaram na aplicação de imagens de satélite para mapear a cobertura vegetal. Queiroz (1985) e Carvalho (1986) empregaram dados MSS/Landsat para investigar a estrutura da vegetação do semiárido brasileiro, enquanto Sá (1991) aprimorou essa abordagem com um mapeamento multiestágio, possibilitando uma análise mais detalhada da heterogeneidade da vegetação. Posteriormente, Barbosa (1999) evidenciou a influência significativa da ocorrência nos índices espectrais, aos dados correlacionais do AVHRR/NOAA com as flutuações do NDVI. Os resultados obtidos revelaram que a vegetação da Caatinga responde rapidamente aos eventos pluviométricos, mas sofre reduções significativas de biomassa em períodos prolongados de estiagem.

Estudos recentes confirmam essa dinâmica ao analisar a relação entre os índices espectrais e os padrões sazonais da vegetação. Abade (2015) empregou séries temporais do

NDVI obtidas pelo sensor MODIS para mapear a cobertura vegetal natural e exótica em uma região de transição Cerrado-Caatinga, reforçando a aplicabilidade do sensoriamento remoto na avaliação de mudanças ambientais. Silva Junior et al. (2022) analisaram a sensibilidade espectral do NDVI e do albedo na Bacia do Rio Pajeú (PE) entre 2015 e 2019, destacando sua relação com as variações sazonais. A pesquisa indicou que o NDVI reflete a dinâmica da vegetação, enquanto o albedo é mais sensível a áreas não vegetadas, especialmente no período seco.

Quanto a relação entre as características espectrais do solo e a distribuição da vegetação também foram temas de estudos. Aquino et al. (2012) aplicaram imagens Landsat 5 TM e o índice NDVI para analisar a dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal no núcleo de desertificação de São Raimundo Nonato (PI), revelando que a exposição do solo e as alterações na vegetação influenciam os padrões de resposta espectral. Esses fatores são importantes para entender os processos de degradação ambiental. De forma complementar, Cunha et al. (2020) analisaram séries temporais de imagens Landsat 5 TM e 7 ETM+ entre 1985 e 2015, aplicando NDVI, EVI e o albedo da superfície. Os autores demonstraram que o albedo, por ser mais sensível a mudanças estruturais no solo, pode ser mais eficaz do que os índices tradicionais na detecção de áreas degradadas na Caatinga.

A integração de diferentes sensores e metodologias tem permitido aumentar a precisão das análises espectrais. Schucknecht et al. (2013) aprofundaram o estudo da resposta espectral da vegetação em ecossistemas semiáridos através da comparação das séries temporais do AVHRR (1982-2006) e MODIS (2001-2006), confirmando sua aplicação para monitorar a desertificação no Nordeste do Brasil. Da mesma forma, Francisco et al. (2012) usaram imagens Landsat 5 TM e índices espectrais NDVI, SAVI, EVI durante 13 anos para realizar a avaliação do estado da vegetação na Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá (PB). A validação das classes por meio do Índice de Biomassa da Vegetação Lenhosa revelou que o NDVI no período seco se mostrou o mais eficiente na distinção da vegetação, identificando a mesma em 9 classes.

Novas abordagens têm sido impulsionadas pelos avanços tecnológicos, como o uso de sensores hiperespectrais para estimar o estado hídrico da vegetação. Santos (2023) utilizou imagens do sentinel-2 e dados hiperespectrais para estimativa do índice de área planta (PAI) de espécies nativas da caatinga, mostrando a forte correlação entre índices espectrais e variabilidade do conteúdo de umidade no solo. Essa análise possibilita um diagnóstico mais preciso do efeito do estresse hídrico e das alterações ambientais sobre a vegetação e é fundamental para prever os impactos das mudanças climáticas sobre o bioma.

Além disso, a modelagem empírica da relação entre índices espectrais e características dendrométricas tem sido explorada para estimar atributos estruturais da vegetação. Almeida et al (2014) aprimoraram modelos preditivos com base em imagens Landsat 5, possibilitando uma caracterização mais precisa da biomassa da Caatinga. Igualmente, Silva Filho et al (2020) elaboraram um modelo matemático para a representação temporal do NDVI, empregando séries Landsat e analisando a eficácia de diversas funções estatísticas em descrição a variação intra-anual da vegetação. O modelo teve um desempenho superior, ajustando-se a 83% dos anos avaliados ( $R^2 = 0,82$ ), demonstrando sua efetividade na observação da dinâmica fenológica e nas respostas da vegetação às alterações climáticas e interferências humanas.

### **2.2.2 Mudanças Climáticas, Desertificação e Impactos Ambientais**

A Caatinga representa um dos biomas mais vulneráveis às transformações, sendo diretamente impactada pelo incremento das temperaturas médias, variações nos padrões de precipitação e a intensificação de períodos de seca prolongada. Além desses elementos climáticos, ações humanas, tais como o desmatamento e a transformação da vegetação nativa para fins agropecuários, têm acelerado a degradação da vegetação, prejudicando sua capacidade de regeneração e risco crescente de desertificação.

Com isso, as áreas com Caatinga apresentam padrões sazonais marcados por aumento da atividade vegetativa durante o período chuvoso e perda foliar durante a estação seca. Nóbrega (1991) realizou um dos primeiros estudos sobre a relação entre a dinâmica climática e a distribuição da vegetação na Caatinga, utilizando dados meteorológicos e levantamentos de campo, demonstrando que as flutuações hídricas e fatores edáficos controlam os padrões espaciais da vegetação semiárida.

Estudos mais recentes corroboraram essa relação por meio do monitoramento remoto. Barbosa et al. (2019) avaliaram séries temporais do NDVI obtidos pelo sensor Meteosat-SEVIRI no período de 2008 a 2016 e constataram que a seca de 2012 impactou mais de 26% das paisagens da Caatinga, impactando sua atividade fotossintética. Aquino et al. (2018) confirmaram essa tendência ao utilizar séries históricas de NDVI oriundas de sensores MODIS, juntamente com dados pluviométricos do semiárido cearense, demonstrando que extensos períodos de estimativa resultaram na perturbação da vegetação, enquanto anos com maior pluviosidade favorecendo sua recuperação parcial.

Eventos climáticos globais afetam de maneira direta a vegetação. Erasmi et al. (2014) estabeleceram uma relação entre a vegetação da região Nordeste do Brasil e as características

do El Niño-Oscilação Sul (ENSO), utilizando séries temporais de NDVI obtidas através do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Os autores constataram que os anos de El Niño resultam em secas prolongadas, comprometendo a recuperação da vegetação e ampliando a vulnerabilidade do solo. Da Silva et al. (2023) empregaram mosaicos anuais de NDVI, concebidos na plataforma Google Earth Engine a partir de imagens do satélite Landsat, para investigar os padrões de precipitação e o crescimento da vegetação entre 1985 e 2019, evidenciando uma queda progressiva da produtividade vegetal e maior vulnerabilidade à degradação.

A conversão da vegetação em pastagens e áreas agrícolas tem sido frequentemente relacionada aos processos de degradação ambiental no semiárido brasileiro. Beuchle et al. (2015) ao aplicarem imagens do Satélite Landsat para mapear as alterações vegetais entre 1990 e 2010, constataram que a substituição da vegetação nativa por área de pastagem ampliou os processos de vulnerabilidade do solo. No mesmo contexto, Tomasella et al. (2018) utilizaram imagens do MODIS para elaboração de uma metodologia fundamentada no NDVI e na análise da persistência do solo exposto, visando avaliar a degradação do semiárido brasileiro entre os anos 2000 e 2016, demonstrando que a exposição contínua do solo está diretamente vinculada à progressão da desertificação.

A fragmentação da vegetação também diminui a habilidade da Caatinga em se recuperar ecologicamente. Araújo e et al. (2022), aplicaram dados do sensor Sentinel-2 para analisar a relação entre a fragmentação florestal e a eficiência no uso da água, concluindo que regiões fragmentadas são mais suscetíveis a períodos de seca prolongada. Outro fator significativo no processo de degradação da Caatinga é a ocorrência de incêndios, que alteram drasticamente a estrutura da vegetação. Nogueira (2017) por meio imagens Landsat-8 demonstrou que áreas submetidas a incêndios recorrentes apresentam menor diversidade estrutural e funcional, resultando na perda progressiva da cobertura vegetal e na intensificação da degradação do solo.

Um dos fenômenos mais sérios que o bioma enfrenta, a desertificação, tem sido extensivamente monitorada utilizando sensoriamento remoto. Freire (2004) examinou imagens Landsat na região de Xingó e constatou que o declínio da vegetação e o aumento da degradação do solo são fatores fundamentais no avanço da desertificação, destacando a importância do NDVI como uma métrica crítica para identificar áreas em risco de degradação. Para identificar áreas no Cariri Paraibano que estavam sofrendo desertificação, Souza (2008) usou imagens Landsat e técnicas de geoprocessamento, no qual verificou que 77,4 % da região já apresentava degradação significativa entre 2005 e 2006, representando um aumento de 14,6 % em relação ao ano de 1989.

O monitoramento ambiental por meio do sensoriamento remoto tem sido essencial para quantificar os impactos das mudanças climáticas e da desertificação. Mariano et al. (2018) investigaram e aplicaram indicadores espectrais derivados de imagens MODIS para monitorar a seca e os efeitos da degradação induzida pelo homem, demonstrando que a perda de vegetação influencia diretamente a temperatura da superfície e os ciclos hidrológicos. Sob uma perspectiva semelhante, Jardim et al. (2022) empregaram séries temporais do MODIS para analisar como as mudanças climáticas e o uso intensivo da terra afetam a vegetação, concluindo que a combinação desses fatores reduz sua resiliência e a torna mais vulnerável à degradação e à desertificação.

### **2.2.3 Dinâmica da Vegetação, Produtividade Primária e Fenologia**

A dinâmica da vegetação da Caatinga é influenciada por fatores climáticos e antrópicos. Determinando assim sua capacidade de regeneração e adaptação às condições ambientais. A mensuração da produtividade primária e dos padrões fenológicos é fundamental para elucidar a resiliência do ecossistema semiárido e sua ocorrência às oscilações climáticas. Desta forma, o monitoramento por meio de sensoriamento remoto tem se mostrado indispensável para a observação dessas informações.

Nesse entendimento, a medição da biomassa na Caatinga tem progredido de forma significativa com a utilização de sensores ópticos e de radar, possibilitando estimativas mais exatas sob diversas condições estruturais da vegetação. Jesus et al. (2023) empregaram imagens SAR (Radar de Abertura Sintética) para avaliar a biomassa aérea de espécies de árvores, mostrando que essa metodologia supera as restrições dos sensores ópticos em regiões de vegetação densa, onde a penetração da luz é reduzida.

A conexão entre biomassa e índices espectrais também tem sido extensivamente pesquisada para aumentar a precisão das estimativas. Luz et al. (2021) estudaram fragmentos de floresta da Caatinga utilizando imagens do RapidEye, constatando que o SAVI teve desempenho superior ( $R^2 = 0,50$ ) na estimação de biomassa em relação ao NDVI e EVI, evidenciando a relevância da seleção de índices espectrais adequados para regiões semiáridas. Lima (2021) empregou imagens do Sentinel-2 para calcular o estoque de carbono e biomassa, ressaltando que as bandas red-edge apresentaram os melhores preditores da biomassa lenhosa, com desempenho mais eficaz na estação chuvosa, quando a vegetação está em seu máximo vigor.

Além da biomassa, a produtividade primária bruta (PPB) e o armazenamento de carbono são fatores fundamentais para compreender a dinâmica vegetacional da Caatinga. Silva (2019) realizou uma análise do PPB, empregando dados do MODIS e conclusões obtidas em torres micrometeorológicas. Sua pesquisa destacou que a precipitação representa o principal fator regulador, no qual resulta em reduções significativas na assimilação de carbono sendo em períodos de seca. Brito Morais et al. (2017) reforçaram essa relação ao utilizar dados MOD17 provenientes do sensor MODIS para investigar o sequestro de carbono na Caatinga de Pernambuco, registrando que áreas preservadas capturam maiores quantidades de carbono durante a estação chuvosa, enquanto áreas degradadas apresentam menor fixação em razão da diminuição da cobertura vegetal e da eficiência fotossintética reduzida.

A fenologia da Caatinga responde diretamente à variabilidade hídrica. Jesus et al. (2021) analisaram séries temporais MODIS e Landsat para avaliar a resposta fenológica da vegetação aberta e densa, constatando que a Caatinga densa mantém maior cobertura foliar ao longo do ano, com início de estação antecipado e duração prolongada. Medeiros et al. (2022) utilizaram séries temporais EVI do sensor MODIS ao longo de 20 anos e evidenciaram que a precipitação regula a duração da estação de crescimento. A combinação de análise estatística e modelagem fenológica com o software TIMESAT permitiu caracterizar a relação entre os ciclos fenológicos e a disponibilidade hídrica.

A degradação da Caatinga influencia diretamente esses processos, por meio da redução da produtividade primária e da capacidade de sequestro de carbono. Oliveira et al. (2022) utilizaram séries temporais MODIS para estudar a degradação da terra e da seca em ecossistemas do Nordeste do Brasil e indicaram que a Caatinga esparsa tem menor atividade fotossintética e mais dependente da variabilidade climática. Da Silva et al. (2017) utilizaram a técnica de covariância de eddy para medir fluxos de CO<sub>2</sub>, água e energia na Caatinga e em pastagem da região. O estudo mostrou que a conversão de vegetação nativa para pastagem reduz a evapotranspiração e aumenta a temperatura da superfície, levando a uma redução da eficiência da fotossíntese e liberação de CO<sub>2</sub>.

Nascimento et al. (2018) utilizaram dados MODIS e medições *in situ* para avaliar o balanço de radiação e energia, identificando que a substituição da vegetação nativa por áreas degradadas compromete a fixação de carbono devido ao aumento de solo exposto e redução da biomassa. Santos (2017) aplicou imagens Landsat-8 e modelagem espectral para estimar os fluxos de CO<sub>2</sub> em áreas preservadas e em regeneração, verificando que áreas em recuperação apresentam maior variabilidade sazonal no sequestro de carbono, evidenciando que a restauração da vegetação pode mitigar os impactos das mudanças climáticas.

## 2.2.4 Hidrologia, Evapotranspiração e Balanço Energético

A disponibilidade hídrica exerce papel fundamental na regulação da produtividade primária e dos ciclos fenológicos da Caatinga. A baixa precipitação e a alta evapotranspiração limitam a retenção de água no solo, influenciando diretamente os processos ecologicamente corretos de crescimento vegetativo. Nesse cenário, o uso de sensoriamento remoto tem possibilitado mais detalhes para entender a relação entre clima, solo e vegetação, permitindo avaliar com mais precisão as necessidades hídricas da vegetação e os efeitos das secas prolongadas.

Considerado uns dos primeiros estudos sobre balanço energético na Caatinga, Pontes (1997) e Feitosa (2005) utilizaram imagens NOAA-AVHRR e Landsat-TM para estimar os fluxos radiativos e o balanço de temperatura da superfície terrestre para a Caatinga. Seus resultados indicaram que a radiação incidente sobre a temperatura da superfície e a umidade do solo exercem influência direta na resiliência da vegetação semiárida. Estudos mais recentes como o de Rodrigues et al. (2009) aplicaram o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) em imagens Landsat 7 ETM+ para estimar variáveis como albedo, NDVI e saldo de radiação bacia do Rio Trussu (CE). Os resultados mostraram que a vegetação se recupera rapidamente após as chuvas e que a influência hídrica afeta diretamente o balanço energético da região.

A análise do balanço hídrico e da evapotranspiração no passar do tempo tem sido aprimorada pelo uso de sensores orbitais. Teixeira (2018) e Brito et al. (2021) empregaram produtos MODIS para avaliar as variações espaciais e sazonais da umidade do solo, no qual destacaram que a heterogeneidade da vegetação pode gerar influência significativa nos padrões de evapotranspiração. Por sua vez, Santos et al. (2020) analisaram séries temporais MODIS para investigar os padrões espaço-temporais de evapotranspiração durante secas intensas. Os resultados demonstraram que a redução da umidade do solo impacta a transpiração da vegetação e a temperatura da superfície, tornando a Caatinga ainda mais vulnerável ao déficit hídrico.

O refinamento das metodologias de estimativa da evapotranspiração foi essencial para aprimorar as análises hidrológicas do bioma. Teixeira et al. (2009), buscaram refinar as configurações do modelo SEBAL para torná-lo mais eficiente no cálculo da evapotranspiração e do balanço de energia no Semiárido brasileiro. Já em Jardim et al. (2022), o SEBAL foi utilizado em imagens Landsat-8 na plataforma Google Earth Engine para modelar a evapotranspiração real e a temperatura da superfície em Petrolina (PE), demonstrando que mudanças no uso da terra impactam diretamente os balanços energéticos ao longo do tempo.



A modelagem hidrológica da Caatinga tem sido, no decorrer do tempo, refinada com integração de dados orbitais e algoritmos preditivos. Em sua pesquisa, Marques et al. (2020), buscaram calibrar modelos hidrológicos oriundos de satélites para estimar a dinâmica hídrica, e assim identificando mais resiliência em solos profundos com maior capacidade de retenção hídrica. Já Lins et al. (2024) usaram o SWAT (Soil and Water Assessment Tool), calibrado com os dados da evapotranspiração do produto MOD16A2 (MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration), para avaliar os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra na hidrologia de uma bacia semiárida. Os resultados puderam indicar que a restauração da vegetação pode mitigar a redução da disponibilidade hídrica em cenários de aquecimento global.

A relação entre a disponibilidade hídrica e a produtividade da vegetação tem sido amplamente explorada no contexto da eficiência do uso da água quanto da chuva. Costa et al. (2022), investigaram as medições de covariância de vórtices combinadas com dados MODIS para avaliar a WUE (Water Use Efficiency) e os fluxos de CO<sub>2</sub> na Caatinga, no qual demonstraram que a eficiência hídrica varia sazonalmente e é determinante na resposta da vegetação às mudanças climáticas. Sob uma perspectiva semelhante. Adicionalmente, Ma et al. (2022) reforçaram essa relação ao analisar dados da rede AMERIFLUX e produtos MODIS para avaliar a variabilidade da GPP e WUE no bioma caatinga, evidenciando que a WUE apresenta forte dependência da disponibilidade hídrica, com diferenças significativas entre períodos úmidos e secos.

No contexto da modelagem de balanço hídrico, Bezerra (2023) desenvolveu o modelo Seasonal Tropical Ecosystem Energy Partitioning (STEPP), baseado no balanço de energia à superfície, para estimar evapotranspiração e umidade do solo na Caatinga. Integrando dados de sensores remotos como MODIS, GEDI e ERA5, e variáveis como NDVI, PAI e umidade do solo, o modelo corrigiu parâmetros aerodinâmicos com mais precisão. O resultado do modelo mostrou desempenho superior aos modelos convencionais, destacando-se como ferramenta eficaz para a gestão hídrica em regiões semiáridas.

Já a degradação da Caatinga tem impactado de maneira direta os processos hidrológicos do bioma. Da Silva et al. (2020) analisaram alterações na cobertura vegetal e nos recursos hídricos da região semiárida, utilizando imagens do satélite Landsat-8 combinadas com o algoritmo SEBAL. Os autores puderam apurar que houve uma redução de aproximadamente 50% nas áreas ocupadas por corpos hídricos entre 2013 e 2015, atribuída à expansão da agropecuária e ao uso intensivo do solo. Ainda, identificaram uma forte relação entre o

desmatamento da Caatinga com a redução da umidade do solo e alteração do balanço hídrico regional.

Quanto a relação entre vegetação e retenção hídrica foi reforçada por Stan et al. (2021), que estudaram a eficiência do uso da água em florestas tropicais secas utilizando séries MODIS, onde demonstraram que estruturas vegetacionais mais densas possuem maior capacidade de retenção hídrica e regulação térmica. Ainda nesse contexto, Oliveira et al. (2023) analisaram dados MODIS e aplicaram o SEBAL para estimar a evapotranspiração e fluxos de carbono na Caatinga, identificando que áreas mais preservadas apresentam maior disponibilidade de água e capacidade de captura de carbono, enquanto regiões degradadas mostram redução na evapotranspiração e na produtividade primária.

### **2.2.5 Modelagem Ambiental e Avanços Recentes**

Os avanços em processamento em nuvem, aprendizado de máquina (Machine Learning) e Big Data têm revolucionado o monitoramento ambiental da Caatinga, permitindo modelagens preditivas e análises automatizadas de alta resolução. A integração dessas tecnologias com fusão de sensores ópticos, radar, LiDAR e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) têm aprimorado significativamente a detecção de mudanças na cobertura vegetal e a avaliação da degradação ambiental.

O Google Earth Engine (GEE) passou a ser uma das plataformas mais empregadas para análise ambiental baseada em séries temporais e sensoriamento remoto, devido à sua capacidade de processar grandes volumes de dados geoespaciais. Da Silva et al. (2022), por meio de sua pesquisa, utilizaram GEE para avaliar a dinâmica espaço-temporal da degradação do solo no semiárido brasileiro, por meio de índices de vegetação (NDVI, LAI) e indicadores hídricos (NDWI) derivados do satélite Landsat-8. Onde demonstraram que a combinação de sensoriamento remoto e processamento em nuvem permite diagnósticos mais rápidos e precisos sobre a degradação da Caatinga.

A utilização de aprendizado de máquina no GEE tem sido fundamental para aprimorar a identificação de mudanças na cobertura do solo e previsão de impactos ambientais. Sousa Junior et al. (2022) e Melo et al. (2022) aplicaram técnicas de geoprocessamento em nuvem para avaliar a cobertura vegetal da Caatinga, demonstrando como a integração de dados orbitais, parâmetros biofísicos e inteligência computacional pode refinar o mapeamento ambiental.

Além disso, a modelagem preditiva fundamentada em aprendizado de máquina tem começado a ser aplicada para antecipar alterações no uso da terra e impactos ambientais. Silva

et al. (2020) aplicaram redes neurais artificiais (ANN - Artificial Neural Networks) para modelar a conversão da cobertura vegetal no semiárido, demonstrando que algoritmos de aprendizado profundo são altamente eficientes na previsão de padrões de desmatamento e degradação. Adicionalmente, Braga et al. (2010), compararam os desempenhos de redes neurais Multi-Layer Perceptron (MLP) e Support Vector Machine (SVM) na classificação do uso e cobertura do solo na Caatinga, evidenciando que esses algoritmos apresentam alta acurácia na segmentação de classes vegetacionais.

Além da modelagem da cobertura do solo, a estimativa da biomassa florestal se aprimorou com aprendizado de máquina. Moura Fernandes et al. (2023) por meio de imagens do satélite Sentinel-2 compararam métodos paramétricos e não-paramétricos, onde demonstraram que algoritmos de aprendizado de máquina apresentam maior precisão na modelagem da estrutura e biomassa da vegetação.

A integração de diversas fontes de dados constitui um dos progressos mais significativos no monitoramento da Caatinga, possibilitando a criação de modelos integrados que combinam dados ópticos, radar e LiDAR. Nessa perspectiva, Silveira et al. (2018) empregaram informações do Sentinel-2 e do LiDAR para melhorar o mapeamento e a avaliação da biomassa florestal, evidenciando a relevância da fusão de diferentes sensores na modelagem ambiental de elevada precisão. Considerando a mesma abordagem, Oliveira (2019) utilizou a tecnologia LiDAR em conjunto com um inventário florestal tradicional para avaliar a biomassa e o carbono, no qual permitiu certificar que a integração dessas metodologias pode melhorar de maneira significativa a medição do estoque de carbono na caatinga.

A modelagem hidrográfica baseada em dados LiDAR tem sido utilizada para prever a dinâmica hídrica da Caatinga. Almeida et al. (2024) em sua pesquisa desenvolveram um modelo de redes hidrográficas semiáridas, demonstrando como a inteligência computacional pode aprimorar a análise espacial dos recursos hídricos em ecossistemas secos, proporcionando maior precisão na estimativa da retenção de água no solo e na identificação de áreas vulneráveis à degradação hídrica.

Nos últimos anos tem aumentado expressivamente o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em análises da estrutura da vegetação, sobretudo, devido à sua capacidade de gerar dados em alta resolução e fácil aquisição. Dos Santos et al. (2022) realizaram um estudo com imagens captadas por VANTs, equipados com câmeras RGB e RGN, para estimar o Índice de área Foliar (LAI) e o Índice de Área da Planta (PAI) em florestas secas da Caatinga. Os dados gerados foram comparados com os índices derivados do Satélite Landsat 8, no qual

apresentou uma forte exibição ( $R^2 = 0,993$ ), reforçando assim os potenciais VANTs no que diz respeito à análise da estrutura da vegetação.

A integração de dados de VANT e imagens de satélite também tem mostrado progressos no acompanhamento de alterações ambientais. Dos Santos et al. (2021) analisaram produtos multiespectrais de Landsat-8, Sentinel-2 e VANTs para investigar mudanças estruturais na Caatinga, chegando à conclusão de que os dados obtidos por drones oferecem melhor detalhamento espacial, possibilitando a identificação de áreas de solo exposto e degradado com mais exatidão. Nesse cenário, Silva Filho et al. (2024) aplicaram técnica de aprendizado de máquina com o algoritmo Random Forest para classificar a cobertura do solo na Caatinga, a partir de imagens RGB e multiespectrais obtidas por VANT, no qual destacou a eficácia dessa abordagem para diferenciar padrões vegetativos em ecossistemas semiáridos.

### **3 IMPACTO DE PERTURBAÇÕES ANTROPOGÊNICAS CRÔNICAS NA DINÂMICA VEGETACIONAL DA CAATINGA**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

A dinâmica da paisagem é um dos temas centrais da análise geossistêmica, considerada uma das dimensões mais complexas dos estudos ambientais, ao envolver interações contínuas entre componentes físicos, biológicos e antrópicos que moldam e transformam o espaço geográfico (Diniz et al., 2015). Como destaca Bertrand (1972), a paisagem não resulta da evolução isolada de seus elementos, mas da combinação dialética e dinâmica entre eles. Nesse sentido, Ab'Saber (2003) ressalta que as paisagens carregam a herança de processos antigos, remodeladas por novas pressões e usos, sobretudo aqueles derivados da ação antrópica. Esse entendimento reforça a concepção de paisagem como um reflexo da história do uso do solo, e não somente de sua configuração natural (Andrade, 2020).

A paisagem da Caatinga vem sendo transformada por atividades produtivas como a pecuária, a agricultura baseada em corte e queima, e a extração de madeira, práticas que impactam diretamente a vegetação lenhosa, contribuindo para a degradação e a fragmentação do habitat (Oliveira, 2017; Silva et al., 2017; Melo, 2017). Essas pressões compõem a chamada perturbação antropogênica crônica (PAC), caracterizada por estressores múltiplos e persistentes que, de forma cumulativa, afetam a estrutura, composição e funcionamento dos ecossistemas naturais (Antongiovanni et al., 2020).

Diferente das intervenções agudas, como o desmatamento total, a PAC ocorre de forma contínua por meio de atividades como coleta de lenha, criação de gado, caça e exploração de produtos florestais não madeireiros (Singh, 1998). Além disso, práticas como o sobrepastoreio, o uso do fogo e a introdução de espécies invasoras agravam esse processo, podendo interromper a regeneração da vegetação (Schulz et al., 2016; Ghazoul et al., 2015). Associam-se a essas causas os impactos indiretos de atividades produtivas e da expansão da infraestrutura (Foley et al., 2005; Mattison e Norris, 2005). Em regiões semiáridas como a Caatinga, onde muitas comunidades dependem diretamente dos recursos naturais, esses distúrbios comprometem a regeneração e a integridade dos ecossistemas (Noutcheu et al., 2004; Barros et al., 2021).

A consequência mais evidente da PAC é a fragmentação da paisagem, que promove a perda de habitat e a redução da conectividade ecológica, afetando diretamente a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (1985; Andrén, 1994; Laurance et al., 2011). Em paisagens semiáridas como a Caatinga, onde a distribuição de recursos é naturalmente heterogênea, os

efeitos da fragmentação tendem a ser ainda mais acentuados na estrutura das paisagens com impactos importantes na biodiversidade (Hobbs et al., 2008).

Ademais, áreas próximas a estradas, centros urbanos, pastagens e assentamentos rurais tendem a apresentar maior grau de perturbação (Ribeiro et al., 2015; Ribeiro-Neto et al., 2016). As estradas, em particular, desempenham um papel relevante nesse contexto, ao facilitar o acesso a regiões antes isoladas, ampliam exposição das bordas dos fragmentos e atuam como vetores de degradação crônica (Laurance et al., 2009). Soma-se a isso a alta densidade populacional, que, associada à dependência dos recursos nativos, aumenta a pressão sobre a vegetação lenhosa (Rito et al., 2017; da Silva et al., 2017).

Diante desse cenário, torna-se essencial adotar abordagens integradoras, como a Geocologia da Paisagem, que permite compreender a paisagem como uma entidade dinâmica, estruturada por processos naturais e sociais, dotada de funcionamento próprio (Rodriguez, Silva e Cavalcanti, 2004). Essa abordagem considera tanto os elementos estruturais e funcionais quanto os distúrbios e a sucessão ecológica, fundamentais para entender a resiliência dos ecossistemas frente às pressões externas.

No caso da Caatinga, a análise geocológica tem sido eficaz para identificar os efeitos da PAC sobre os remanescentes florestais e os padrões de fragmentação. Como observa Cavalcanti (2014), o funcionamento da paisagem pode ser analisado por variáveis como balanço hídrico, produtividade da biomassa e fluxos de energia, indicadores do grau de estabilidade ou degradação ecológica. Tais processos, frequentemente alterados por usos históricos da terra, resultam em estados vegetacionais empobrecidos e com baixa capacidade de regeneração.

Desta forma, uma modelagem cartográfica baseada no uso combinado de sensoriamento remoto e geoprocessamento, tem sido mostrada fundamental para a identificação das unidades de paisagem, bem como para a detecção de alterações em sua configuração estrutural ao longo do tempo (Cavalcanti, 2014; Diniz, 2015). A utilização de bancos de dados de Uso e Cobertura da Terra (LULC) tem ampliado essa capacidade analítica, contribuindo para o monitoramento contínuo das paisagens e para a identificação de processos de manipulação (Sarma et al., 2008).

Complementar à perspectiva geocológica, a Ecologia da Paisagem oferece uma base teórica e metodológica essencial para compreender a organização espacial dos ecossistemas e suas consequências sobre a dinâmica ambiental. Consolidada por autores como Forman e Godron (1986), Turner (1989) e Wiens (2002), essa abordagem científica enfatiza a importância dos padrões espaciais, como manchas, corredores e matriz, na regulação dos fluxos de energia,

matéria e organismos. Tais padrões influenciam diretamente a biodiversidade, a conectividade e os processos de regeneração ecológica (McGarigal & Marks, 1995; Metzger, 2001).

Na Caatinga, a aplicação desse arcabouço tem permitido avaliar os impactos da fragmentação e da perturbação crônica sobre os remanescentes florestais, com base em métricas que descrevem a composição, forma e isolamento dos fragmentos (Fonseca, 2017; Oliveira, 2022; Silva de Oliveira, 2023). Mesmo em áreas aparentemente contínuas, essas métricas têm revelado perda de funcionalidade ecológica, associada ao aumento da exposição das bordas e à desconexão estrutural.

Indicadores como área, densidade de borda, distância entre manchas e complexidade de forma têm se mostrado eficazes para avaliar o grau de perturbação e a integridade ecológica das paisagens (Neel et al., 2004; Syrbe & Walz, 2012). Na Caatinga, essas métricas auxiliam na identificação de áreas mais vulneráveis, no monitoramento da fragmentação e na definição de estratégias de conservação (Jesus et al., 2015; Pereira et al., 2017; Jesus et al., 2019).

Assim, compreender a dinâmica da vegetação lenhosa na Caatinga exige uma abordagem integrada, que considere tanto os processos ecológicos quanto os fatores sociais e espaciais que moldam a paisagem. Nesse contexto, este capítulo tem como objetivo analisar os padrões de mudança da cobertura vegetal lenhosa em função da estrutura da paisagem e da fragmentação espacial, destacando os efeitos das perturbações antrópicas crônicas sobre os remanescentes florestais.

## 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A investigação da dinâmica da vegetação lenhosa na Caatinga exigiu a adoção de uma abordagem metodológica integrada, articulando dados multitemporais de sensoriamento remoto, processamento em ambiente computacional e aplicação de modelos espectrais e classificatórios. A estrutura metodológica foi organizada em duas etapas principais: a primeira voltada à aquisição e preparação dos dados, e a segunda dedicada à análise e interpretação dos padrões de mudança da cobertura vegetal.

### 3.2.1 Aquisição e Pré-processamento dos Dados

A investigação da dinâmica e dos padrões de mudança da vegetação lenhosa na Caatinga foi conduzida por meio da análise de séries temporais de dados orbitais, com ênfase nos anos de 1987, 2005 e 2024 para o estudo histórico do uso e cobertura da terra (LULC, do inglês *Land*

*Use and Land Cover*), e no período de 2016 a 2024 para a avaliação da dinâmica recente da vegetação lenhosa. A escolha dos anos históricos se deu com base na disponibilidade de dados e na possibilidade de organizar o período em dois intervalos regulares e comparáveis, favorecendo uma interpretação clara da evolução espacial em fases distintas. Esta etapa inicial se concentrou na seleção criteriosa das imagens orbitais e na preparação dos dados.

### 3.2.1.1 Dados de sensoriamento óptico

Para a análise histórica do uso e cobertura da terra, foram utilizadas imagens dos sensores TM (Landsat 5) e OLI (Landsat 8), com resolução espacial de 30 metros, todas pertencentes à órbita 215, pontos 66 e 67. As imagens foram selecionadas preferencialmente para o período seco da região, conforme indicado por Chaves et al. (2008), com cobertura de nuvens inferior a 5%, a fim de garantir maior visibilidade da vegetação nativa da Caatinga.

A partir de 2016 até 2024, com o objetivo de obter maior detalhamento espacial e temporal das formações lenhosas, foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 (sensor MSI), com resolução espacial de 10 metros nas bandas ópticas utilizadas. As imagens foram extraídas da coleção Harmonized Sentinel-2 Level-2A, disponibilizada pela Agência Espacial Europeia (ESA). Esse conjunto de dados apresenta vantagem operacional por sua alta frequência de revisita (a cada 5 dias), ampliando a capacidade de observação e detecção de variações e mudanças estruturais da vegetação. Os detalhes das imagens de satélite utilizados são apresentados no **Quadro 1**.

Quadro 1 - Detalhe e dados dos satélites utilizados.

<b>Características</b>	<b>Landsat 5 TM (Thematic Mapper)<sup>1</sup></b>	<b>Landsat 8 OLI (Operational Land Imager)<sup>1</sup></b>	<b>Sentinel 2 MSI (Multispectral Instrument)<sup>2</sup></b>
Cenário	1987 e 2005	2024	2016 a 2024
Data de Aquisição	Período seco	Período seco	Período seco
Recobrimento Espectral	0,450 a 12,50 (µm)	0,443 a 12,005 (µm)	0,443 a 2,190 (µm)
Resolução Radiométrica	8 bits	12 bits	12 bits
Resolução Espacial	30 (m)	30 (m)	10 e 20 (m)
Resolução Temporal	16 dias	16 dias	5 dias

Fonte: <sup>1</sup>United States Geological Survey (USGS); <sup>2</sup>European Space Agency (ESA)

### 3.2.1.2 Plataforma de Processamento

Todas as etapas de obtenção, organização, filtragem e pré-processamento das imagens foram realizadas na plataforma Google Earth Engine (GEE). Esta plataforma em nuvem,



fornecida pela Google Cloud Infrastructure, oferece acesso a uma base de dados geoespaciais robusta, com capacidade computacional escalável para o processamento e análise de imagens em escala regional (Gorelick et al., 2017).

Além disso, o GEE proporciona uma mudança significativa em relação aos fluxos tradicionais de softwares de sensoriamento remoto, ao permitir que análises e interpretações sejam realizadas diretamente na nuvem, sem a necessidade de download, pré-processamento local ou armazenamento dos dados (Cui et al., 2021; Mirmazloumi et al., 2022).

### **3.2.2 Método e Análise dos Dados**

A etapa analítica foi conduzida a partir de um conjunto de procedimentos metodológicos articulados, orientados à extração e interpretação de informações sobre a estrutura e a evolução da paisagem. A partir de uma abordagem sistemática, buscou-se traduzir os dados processados em indicadores capazes de revelar os processos que moldam a vegetação lenhosa ao longo do tempo.

#### **3.2.2.1 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)**

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) é uma técnica aplicada a imagem de sensoriamento remoto com a finalidade de transformar, reduzir e realçar os dados espectrais contidos em cada pixel, convertendo-os em informações físicas, resultando nas chamadas imagens-fração (Shimabukuro e Ponzoni, 2017).

O modelo se baseia na premissa de que a resposta espectral de um pixel, em qualquer banda, é resultado de uma combinação linear das assinaturas espectrais de componentes puros, denominados endmembers. A partir do conhecimento prévio das assinaturas espectrais desses endmembers, é possível decompor a reflectância observada em proporções que representem a contribuição individual de cada componente (Shimabukuro e Smith, 1991). Com base nessa premissa, o MLME permite estimar a composição espectral em nível subpixel, oferecendo uma representação mais detalhada e realista da paisagem (Shimabukuro et al., 2020).

#### *Formulação*

O modelo assume que a resposta espectral de um pixel é uma combinação linear das respostas espectrais de cada endmember ponderada por sua proporção dentro do pixel

(Shimabukuro e Smith, 1991; Shimabukuro e Ponzoni, 2017). A equação geral do MLME é expressa da seguinte forma:

$$r_i = \sum_{j=1}^m x_j a_{i,j} + e_i \quad (1)$$

Onde,  $r_i$  é a reflectância observada na banda  $i$ ;  $a_{i,j}$  representa a reflectância do  $j$ -ésimo endmember na banda  $i$ ;  $x_j$  é a fração do endmember  $j$  no pixel;  $e_i$  é o erro residual para a banda  $i$ ;  $m$  é o número de componentes na mistura (geralmente 3: vegetação, solo, sombra);  $n$  é o número de bandas espectrais.

#### *Seleção dos Endmembers*

A seleção dos endmembers é uma etapa fundamental para a aplicação do MLME, sendo determinante para a acurácia dos resultados obtidos. No presente estudo, foram definidos três componentes espectrais principais: vegetação, solo exposto e sombra/água, por se tratarem de alvos predominantes e espectralmente bem diferenciados na paisagem analisada (Shimabukuro et al., 2020; Pio et al., 2023).

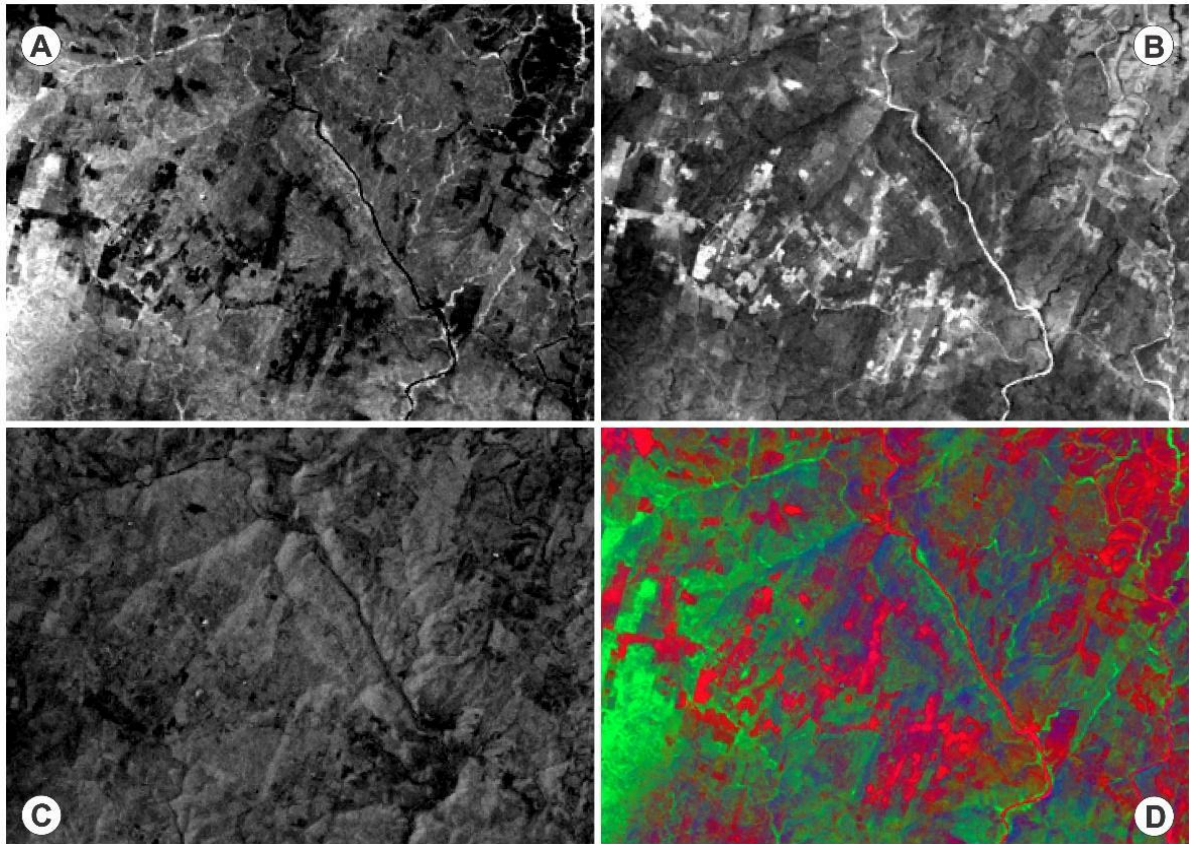
A extração dos endmembers foi realizada diretamente nas imagens de satélite, por meio de inspeção visual de áreas homogêneas e bem definidas, utilizando a composição colorida RGB. Foram selecionados pixels espectralmente puros e representativos de cada componente, garantindo a fidelidade espectral dos alvos de interesse e assegurando a representatividade dos dados utilizados na modelagem (Shimabukuro et al., 2020; Pio et al., 2023).

Para garantir a correta aplicação do MLME, foi respeitada a condição básica do modelo, segundo a qual o número de endmembers selecionados deve ser inferior ou igual ao número de bandas espectrais utilizadas ( $m \leq n$ ), conforme estabelecido por Keshava e Mustard (2002).

#### *Geração das Imagens Fração*

Com os endmembers previamente definidos, o MLME foi aplicado sobre a composição multiespectral da cena, utilizando bandas do espectro visível. A aplicação resultou na geração de três imagens fração, representando as proporções relativas dos componentes vegetação, solo exposto e água em cada pixel. Tais produtos representam dados contínuos que permitem uma caracterização mais detalhada da composição espectral subpixel, ampliando a sensibilidade à heterogeneidade da paisagem (**Figura 5**).

Figura 5 - Cenas das imagens fração. (A) imagem fração de vegetação, (B) imagem fração do solo, (C) imagem fração de sombra/água e (D) composição colorida das imagens fração, o MLME.



Fonte: O autor

Por se tratar de uma técnica de transformação e realce espectral, e não de classificação, os resultados do MLME foram utilizados como base auxiliar na seleção das amostras de treinamento e subsidiar o processo de classificação supervisionada conduzido posteriormente. A utilização das imagens fração como variáveis auxiliares permitiu refinar a segmentação temática da paisagem e melhorar a acurácia do mapeamento final, conforme indicado em aplicações semelhantes (Shimabukuro et al., 2020; Pio et al., 2023).

### 3.2.2.2 Classificação LULC e Mapeamento da cobertura vegetal

A classificação do uso e cobertura da terra (LULC), bem como o mapeamento da cobertura vegetal, foi realizada utilizando o algoritmo Random Forest (RF), disponível entre os classificadores supervisionados da plataforma Google Earth Engine (GEE). Diversos estudos apontam o RF como um dos algoritmos com maior desempenho em termos de acurácia em comparação com outros métodos de classificação supervisionada (Pelletier et al., 2016; Zurqani et al., 2018).

O Random Forest é um algoritmo de aprendizado baseado em conjuntos de árvores de decisão, construídas por meio de amostras de *bootstrap*. A predição final é determinada pela maioria dos votos das árvores individuais. Entre suas principais vantagens, destacam-se a alta precisão, a capacidade de lidar com milhares de variáveis de entrada e a robustez contra overfitting (Ge et al., 2019).

As amostras de treinamento foram inseridas diretamente na interface do GEE, com base nas classes temáticas definidas para o mapeamento. Para a classificação, foram configuradas 100 árvores de decisão e os dados foram divididos em 70% para treinamento e 30% para validação.

A definição das classes seguiu critérios baseados no comportamento temporal da vegetação, no porte estrutural e nas formas de uso da terra, conforme o Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE (2013) e as propostas de cobertura vegetal de Cavalcanti (2014), uma classificação recentemente desenvolvida e simples de se discernir em campo, o que facilita a logística de validação do mapeamento (Silva e Cruz, 2018).

Com base na metodologia adotada, foram definidas cinco classes de uso e cobertura da terra, as quais foram posteriormente agrupadas para compor duas classes finais (LULC), conforme descrito no **Quadro 2**. Esse agrupamento foi estruturado a partir de duas temáticas principais: natural e antrópica.

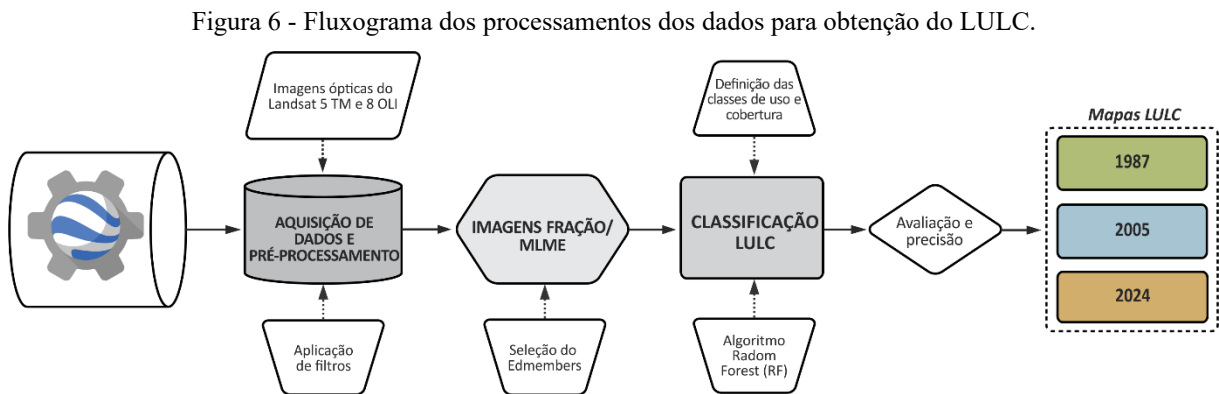
Quadro 2 - Classes de uso e cobertura definidas para pesquisa.

Classes de uso e cobertura	Classes LULC final	Descrição	Temática
Caatinga lenhosa (CL) <sup>1</sup>	Caatinga lenhosa (CL)	Vegetação dominada por elementos lenhosos (árvores e arbustos) da flora da Caatinga. Pode ser subdividida em catinga lenhosa aberta ou fechada.	Natural
Caatinga gramíneo-lenhosa (CG) <sup>1</sup>	Caatinga gramíneo-lenhosa (CG)	Vegetação dominada por elementos herbáceos, com presença de indivíduos lenhosos esparsos ou em agrupamentos isolados.	Natural
Agropecuária (AG) <sup>2</sup>	Áreas antropizadas (AA)	Definida como terra utilizada para a produção agrícola cultivada (lavouras) ou pousio e pecuária (pastagens)	Antrópica
Solo descoberto (SD) <sup>2</sup>	Áreas antropizadas (AA)	Defina como área de solo sem cobertura e exposta, vegetação estéril ou escassa	Antrópica
Áreas urbanas e edificadas (AU) <sup>2</sup>	Áreas antropizadas (AA)	Definida pelas manchas urbanas e obras de engenharia como rodovias	Antrópica

Fonte: <sup>1</sup>Cavalcanti (2014) e <sup>2</sup>IBGE (2013).

Na temática natural, foram incluídas as classes Caatinga lenhosa (CL) e Caatinga gramíneo-lenhosa (CG), representando formações vegetais nativas da Caatinga, com predomínio de espécies lenhosas ou herbáceas, respectivamente. Já na temática antrópica, as calasses de agropecuária (AG), solo descoberto (SD) e áreas urbanas e edificadas (AU), caracterizando usos do solo, foram reclassificadas como áreas antropizadas (AA).

Para minimizar erros de classificação, especialmente relacionados às áreas urbanas, esta classe foi mapeada separadamente por meio de técnicas em SIG e posteriormente integrada ao mapa LULC por meio de álgebra de mapas. Essa abordagem complementar contribuiu para maior precisão na delimitação das regiões urbanizadas. O processo completo de classificação e integração das classes de uso e cobertura da terra está sintetizado no Fluxograma (Figura 6), que apresenta o fluxo metodológico adotado para a geração do mapa final de LULC.



Fonte: O autor

### 3.2.2.3 Análise de mudança e da dinâmica da vegetação

Para a compreensão dos processos de uso e cobertura da terra (LULC) ao longo do tempo, foi realizada uma análise da dinâmica da vegetação com base na detecção de mudanças espaciais entre diferentes períodos. Essa etapa metodológica teve como objetivo identificar padrões de transformação da paisagem e inferir os processos envolvidos nessas mudanças.

A análise foi conduzida por meio da geração de matrizes de transição, que permitiram quantificar as alterações entre as classes LULC mapeadas em distintos anos. As matrizes forneceram subsídios para avaliar a magnitude, direção e frequência das conversões entre as categorias temáticas definidas.

Com base na proposta metodológica de Cavalcanti (2014), as paisagens foram analisadas de acordo com sua tipologia de dinâmica e evolução, levando-se em consideração

três aspectos centrais: estado atual, intensidade da dinâmica e características de transformação. O primeiro critério aplicado consistiu na diferenciação entre paisagens de caráter natural ou antrópico, com base na cobertura vegetal identificada, considerada um indicador eficiente das tipologias dos geossistemas (Bertrand, 1972).

A partir da análise dos padrões espaciais de mudança, foi possível identificar estágios distintos de transformação da vegetação da Caatinga, permitindo inferir a atuação de diferentes agentes antrópicos e naturais no processo de modificação da paisagem. Os critérios utilizados para essa classificação, bem como os padrões identificados, estão sistematizados no **Quadro 3**.

Quadro 3 - Classificação das classes dinâmicas definidas para pesquisa.

<b>Dinâmica</b>	<b>Características dinâmicas a partir da classificação</b>
Vegetação remanescente	CL -> CL, CG -> CG
Vegetação em regeneração	CG -> CL, AA -> CG, AA -> CL, AA -> CG
Vegetação em degradação	CL -> CG, CL -> AA, CG -> AA

Legenda: CL -Caatinga Lenhosa; CG – Caatinga Gramínea Lenhosa; AA – Áreas Antropizadas. Fonte: O autor

#### 3.2.2.4 Avaliação da classificação e precisão

A avaliação da classificação de uso e cobertura da terra (LULC) foi realizada com base em um conjunto de pontos de validação, correspondente a 30% do total de amostras, previamente separado do banco de dados utilizado. Esses pontos foram comparados estatisticamente com os resultados da classificação final.

Em seguida, foram aplicadas matrizes de confusão para medir o desempenho da classificação, permitindo o cálculo da Precisão Geral (Overall Accuracy – OA) e do Coeficiente Kappa (K), além de métricas associadas aos erros omitidos e inclusos, representadas pela Precisão do Usuário (User’s Accuracy – UA) e Precisão do Produtor (Producer’s Accuracy – PA). Esses indicadores, derivados diretamente da matriz de confusão, variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximos de 1, maior é a acurácia da classificação (Congalton, 1991; Foody, 2008).

A precisão é normalmente o grau de proximidade dos resultados com valores aceitos como verdadeiros, enquanto o coeficiente Kappa expressa a redução proporcional dos erros gerados por um processo de classificação em comparação com o erro de uma classificação completamente aleatória (Tassi e Vazzari, 2020).

### 3.2.2.5 Extração da vegetação da caatinga lenhosa do recorte temporal da pesquisa

Com o objetivo de aprimorar a análise da dinâmica da vegetação na Caatinga, adotou-se como parâmetro a resolução espacial das imagens, permitindo uma delimitação mais detalhada e precisa das áreas de vegetação e das mudanças ocorridas ao longo do tempo. Para esse propósito, foram empregadas imagens do satélite Sentinel-2, no qual sua resolução espacial de 10 metros se destacou como um diferencial para o mapeamento das formações lenhosas.

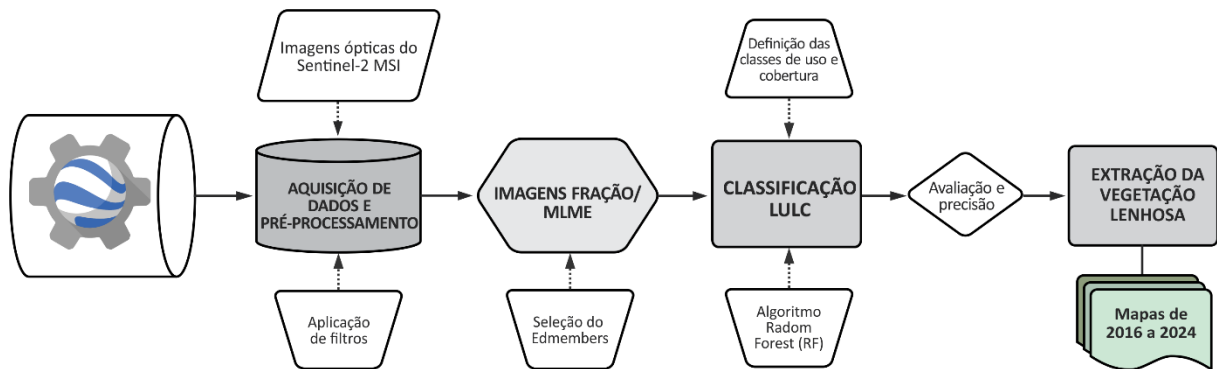
Apesar dessa vantagem, o Sentinel-2 passou a operar apenas a partir de junho de 2015, oferecendo uma série histórica relativamente recente. Dessa forma, foi adotado como recorte temporal da pesquisa o período de 2016 a 2024, correspondente aos sete anos completos de imageamento. Esse intervalo foi utilizado como base para todas as análises subsequentes, especialmente aquelas voltadas à compreensão da dinâmica e fenologia da vegetação.

A metodologia utilizada para a extração da vegetação da Caatinga lenhosa seguiu o mesmo procedimento descrito na Seção 3.2.2.2, voltado ao mapeamento LULC. No entanto, o foco desta etapa foi distinto: tratou-se de criar, para cada ano avaliado, uma máscara específica de recorte da vegetação, com o objetivo de isolar apenas os pixels dominados por vegetação lenhosa. Essa delimitação visou eliminar dados indesejados, como anomalias e interferências externas, que poderiam comprometer a precisão das análises temporais, especialmente aquelas relacionadas à sazonalidade da vegetação.

A criação dessas máscaras permitiu isolar a vegetação das demais características presentes na área de estudo. Ao analisar apenas vegetação, é eliminado a interferência de outras características, como áreas agrícolas cultivada (lavouras), pousio ou pastagens, estradas, construções ou corpos d'água, que podem causar distorções no resultado das análises.

Ao restringir a análise às áreas efetivamente ocupadas por vegetação lenhosa, buscou-se aumentar a fidelidade dos dados extraídos e garantir que as variações identificadas ao longo da série temporal estivessem de fato relacionadas ao comportamento da vegetação-alvo. O fluxo de trabalho adotado para a classificação, extração da vegetação e geração das máscaras anuais está representado na **Figura 7**.

Figura 7 - Fluxograma dos processamentos dos dados para extração da vegetação da caatinga lenhosa.



Fonte: O autor

### 3.2.2.6 Aplicação das Métricas da Paisagem

Para avaliar a fragmentação da vegetação lenhosa na paisagem da Caatinga, foram utilizadas métricas da Ecologia da Paisagem calculadas com base em dados vetoriais dos fragmentos, derivados do mapeamento da cobertura vegetal da caatinga lenhosa. As análises seguiram os pressupostos do modelo conceitual mancha-corredor-matriz, conforme proposto por Forman e Godron (1986), sendo implementadas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

As métricas selecionadas foram calculadas e aplicadas nos níveis de classe e de paisagem, conforme as propostas metodológicas de McGarigal e Marks (1995), com o objetivo de quantificar a configuração espacial dos remanescentes florestais e entender os efeitos da fragmentação sobre a estrutura da vegetação. As métricas escolhidas abrangem tanto a composição quanto a configuração da paisagem, conforme operacionalizadas por Oliveira (2023) e Pereira et al. (2001):

#### a) Área do Fragmento (CA – Class Area)

A área dos fragmentos é uma métrica básica da composição da paisagem. É essencial para inferir sobre a capacidade do fragmento em manter populações viáveis de espécies e resistir a perturbações ambientais.

$$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

Onde,  $a_{ij}$  é área  $m^2$  da mancha  $j$  da classe  $i$ ;  $n$  é o número total de manchas da classe  $i$



*b) Número de Fragmentos (NP – Number of Patches)*

Essa métrica quantifica a quantidade total de manchas (fragmentos) presentes em uma determinada classe temática da paisagem. Um aumento no número de NP, especialmente com predominância de fragmentos pequenos, é indicativo de fragmentação acentuada.

$$NP = n_i \quad (3)$$

Onde,  $n_i$  é número total de fragmentos da classe  $i$

*c) Densidade de Borda (ED – Edge Density)*

A densidade de borda quantifica o comprimento total das bordas entre manchas por unidade de área da paisagem, refletindo o grau de exposição dos fragmentos aos efeitos de borda. Fragmentos com maior ED tendem a ser mais vulneráveis a alterações microclimáticas e pressões antrópicas.

$$ED = \left( \sum_{k=1}^m e_{ik} \right) \div (A \times 10,000) \quad (4)$$

Onde,  $e_{ik}$  é o comprimento total das bordas entre as classes  $i$  e  $k$  (em metros);  $A$  é a área total da paisagem (em  $m^2$ )

*d) Distância Média do Vizinho Mais Próximo (MNN – Mean Nearest Neighbor Distance)*

A métrica MNN mede a distância da borda de uma mancha até a borda da mancha mais próxima da mesma classe, sendo um indicativo do grau de isolamento dos fragmentos e do potencial conectividade ecológica.

$$MNN = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^n h_{ij} \quad (5)$$

Onde,  $h_{ij}$  é a distância da mancha  $j$  até sua vizinha mais próxima da mesma classe;  $n_i$  é o número total de manchas da classe  $i$

A combinação dessas métricas permitiu avaliar tanto a composição (por meio da área total e do número de fragmentos) quanto a configuração espacial (via densidade de borda e

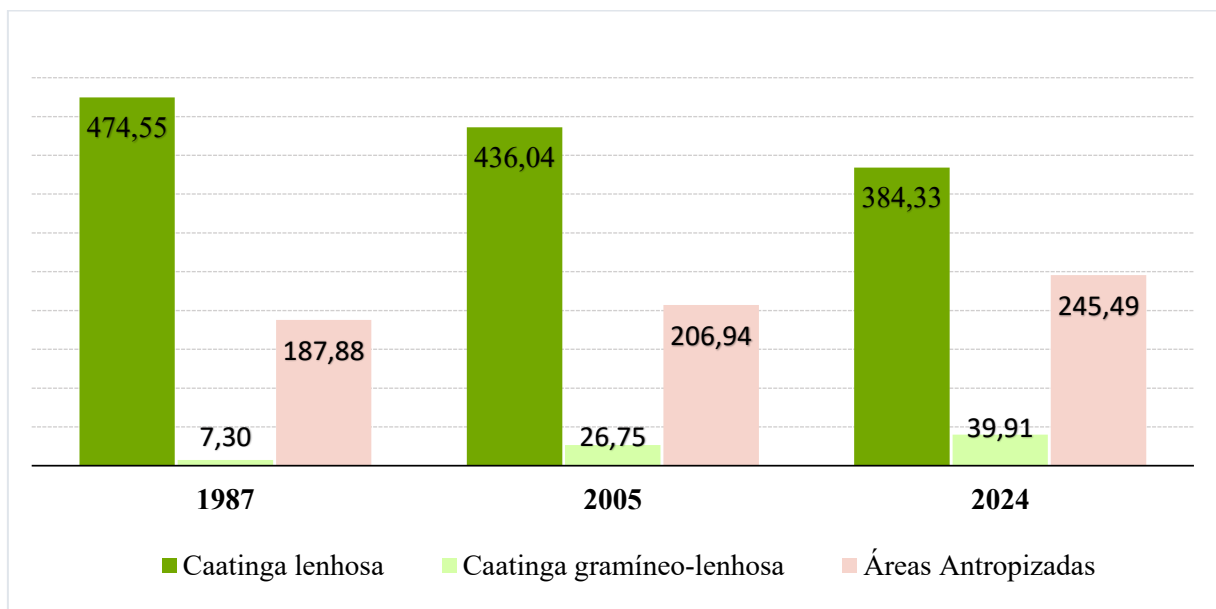
distância média entre fragmentos), fornecendo subsídios para entender os efeitos da fragmentação antrópica sobre a vegetação lenhosa da Caatinga.

### 3.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS PADRÕES DE MUDANÇA DO USO E COBERTURA DA TERRA

A análise da cobertura da terra nos anos de 1987, 2005 e 2024 revela transformações substanciais na configuração da paisagem ao longo das últimas décadas. Conforme apresentado na **Tabela 1** e nas **Figuras 8 e 9**, houve uma redução expressiva da vegetação lenhosa e uma expansão contínua das áreas antrópicas, como agropecuária e áreas urbanas, evidenciando a intensificação do uso do solo. Esses resultados apontam para uma trajetória marcada pela substituição progressiva das formações naturais por usos econômicos, reforçando o papel das perturbações antrópicas na estruturação atual da paisagem.

Ainda que esse recorte extrapole o intervalo principal da pesquisa (2016–2024), a análise histórica permite identificar padrões persistentes de ocupação e os vetores responsáveis pela fragmentação e degradação da vegetação nativa. As classificações utilizadas foram elaboradas conforme a metodologia descrita anteriormente, com as classes definidas no Quadro 2.

Figura 8 - Comparação do padrão e evolução as proporções das classes nos anos analisados.



Fonte: O autor

Tabela 1 - Classes de vegetação na área de estudo nos anos de 1987, 2005 e 2024.

Classes LULC	1987		2005		2024	
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%
Caatinga lenhosa	474,55	70,85	436,04	65,11	384,33	57,37
Caatinga gramíneo-lenhosa	7,30	1,1	26,75	4,99	39,91	5,96
Áreas antropizadas	187,88	28,05	206,94	30,90	245,49	36,67
<b>Total</b>	<b>669,73</b>	<b>100,00</b>	<b>669,73</b>	<b>100,00</b>	<b>669,73</b>	<b>100,00</b>

Fonte: O autor

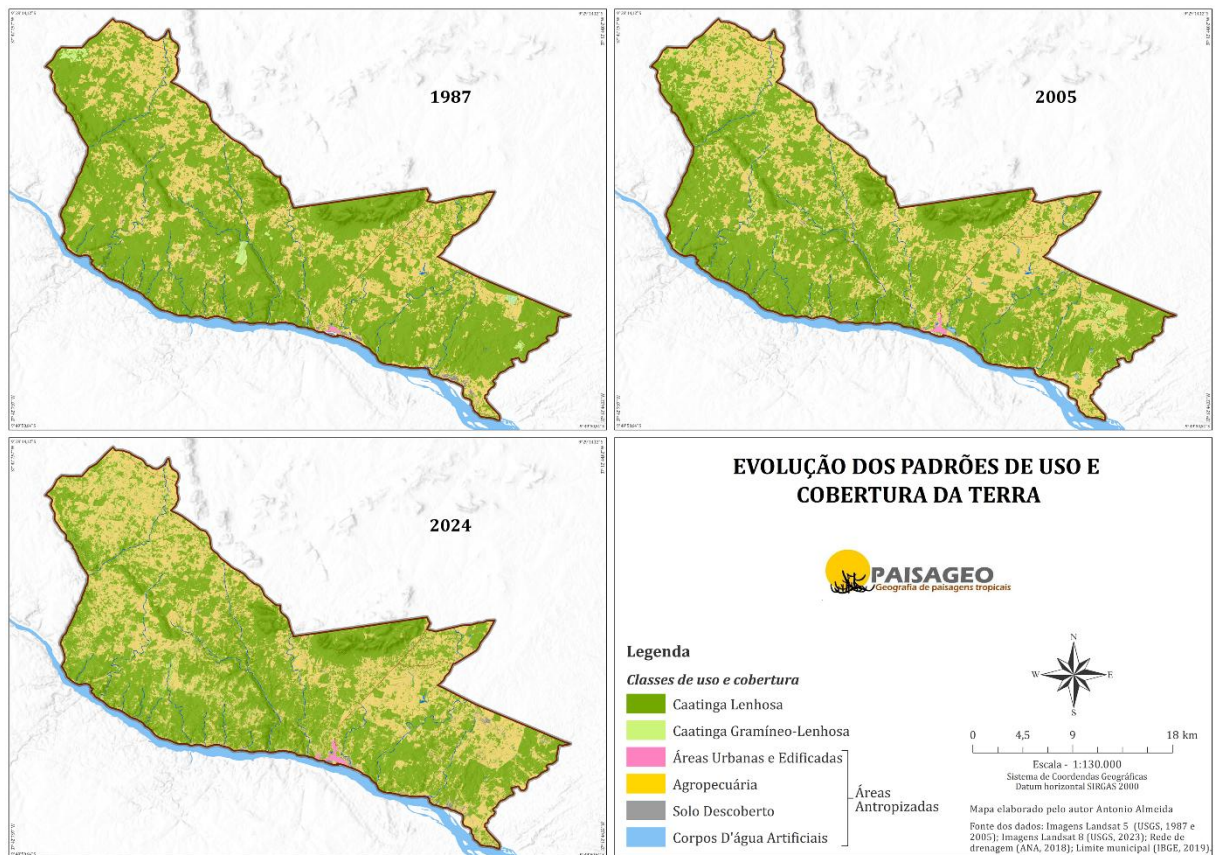
Observa-se que as classes analisadas apresentaram comportamentos distintos ao longo do tempo, com destaque para a redução da Caatinga Lenhosa (CL) e a expansão das Áreas Antropizadas (AA), refletindo transformações significativas nas formações vegetais nativas causadas pelo uso intensivo da terra. Em 1987, a CL ainda predominava na paisagem, ocupando 474,545 km<sup>2</sup> (70,85%), enquanto as AA abrangiam 187,891 km<sup>2</sup> (28,05%). Apesar da predominância da vegetação nativa, já se observavam sinais de fragmentação, especialmente nas bordas e ao longo dos eixos de ocupação rural, indicando um processo de transformação em curso.

Em 2005, a trajetória de substituição da vegetação nativa por usos antrópicos se intensificou com a redução da CL para 436,037 km<sup>2</sup> (65,11%) e o aumento das AA para 206,976 km<sup>2</sup> (30,90%), refletindo o impacto contínuo das pressões humanas sobre a paisagem. Já em 2024, os dados confirmam a intensificação do processo de transformação da paisagem, com a CL reduzida a 394,33 km<sup>2</sup> (57,37%) e as AA atingindo 245,49 km<sup>2</sup> (36,67%), evidenciando um avanço persistente da ocupação antrópica em detrimento da cobertura vegetal nativa.

Essa evolução inversamente proporcional entre as classes se evidencia com mais intensidade nas porções Noroeste e Nordeste da área de estudo, onde os mapas revelam uma expansão significativa das áreas antropizadas (**Figura 9**). Nessas regiões, a pressão antrópica foi mais intensa, resultando em maior desconexão entre os fragmentos remanescentes de vegetação lenhosa, o que indica um aumento da fragmentação da paisagem e do isolamento dos remanescentes florestais.

A evolução observada, evidenciada tanto pelos dados quantitativos quanto pela análise visual dos mapas, revela a influência da trajetória histórica da ocupação do território. As perturbações antrópicas desempenham um papel central na configuração da paisagem, afetando os padrões de conectividade e estabilidade da vegetação lenhosa da Caatinga. Diante dessa complexidade espacial e ecológica, torna-se essencial garantir a confiabilidade dos produtos cartográficos utilizados na análise.

Figura 9 - Mapas dos padrões de uso e cobertura da terra para os anos de 1987, 2005 e 2024.



Fonte: O autor

Conforme os resultados apresentados na **Tabela 2**, a acurácia das classificações da cobertura vegetal foi considerada elevada em todos os anos avaliados, assegurando precisão na interpretação dos dados. O classificador Random Forest (RF) obteve precisão geral (OA) superior a 98% para os três anos analisados, com valores de 98,54% em 1987, 98,84% em 2005 e 98,89% em 2023. Os coeficientes Kappa (K) variaram entre 0,98 e 0,99, o que indica excelente concordância entre os dados classificados e os dados de referência.

Tabela 2 - Precisões da classificação para 1987, 2005 e 2024.

Classes	1987		2005		2024	
	UA	PA	UA	PA	UA	PA
Caatinga lenhosa	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99
Caatinga gramíneo-lenhosa	0,98	0,87	0,98	0,97	0,93	0,91
Áreas antropizadas	0,97	0,94	0,97	0,98	0,98	0,96
Precisão Geral - OA	98,54%		98,84%		98,89%	
Coefficiente Kappa - K	0,98		0,99		0,98	

As maiores precisões por classe foram observadas na CL, cuja assinatura espectral facilitou sua distinção nas imagens, com valores de UA e PA variando de 0,97 a 0,99 em todos os anos. Já a CG apresentou as menores taxas, especialmente no ano de 1987, com um PA de apenas 0,87, subindo para 0,91 em 2023. Essa menor acurácia pode estar relacionada à semelhança espectral da CG com outras formações, principalmente áreas em fase de regeneração inicial, áreas abandonadas ou em pousio, em que algumas vegetações herbáceas e outras espécies lenhosas se desenvolvem.

A classe AA também apresentaram desempenho consistente nas classificações ao longo dos anos analisados. Com valores de UA variando entre 0,97 e 0,98 e PA entre 0,94 e 0,96, essa classe demonstrou alta estabilidade na identificação e delimitação espacial, o que indica que suas características espectrais são bem captadas pelo classificador, mesmo diante de variações sazonais e ambientais da região semiárida.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS DINÂMICAS DA VEGETAÇÃO E DA ESTRUTURA DA PAISAGEM

Em geral, a área de estudo testemunhou mudanças consideráveis em sua cobertura vegetal ao longo das últimas três décadas, com alterações distribuídas por toda a paisagem, embora mais intensamente concentradas nas porções Nordeste e Sudoeste. Essas mudanças refletem processos dinâmicos impulsionados, em grande parte, pelas perturbações antrópicas crônicas, que historicamente predomina na região, ocasionando a substituição da vegetação lenhosa original por formas mais abertas e degradadas da Caatinga, frequentemente com fisionomia arbustiva e marcada pela exposição do solo.

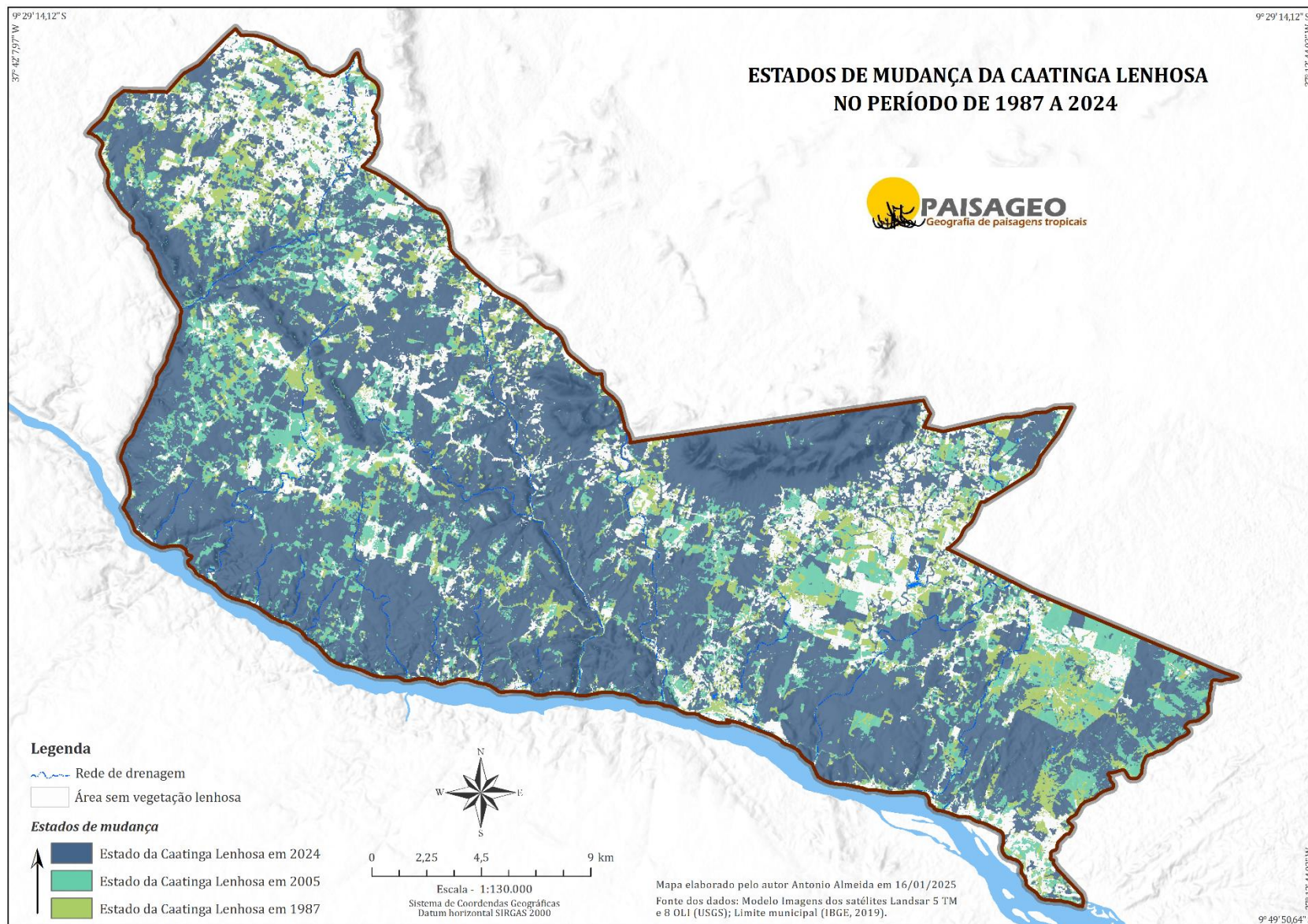
A essa condição se atribui a formação de uma “Caatinga antropizada”, que expressa a fragilidade ecológica resultante da crescente pressão humana sobre os elementos naturais da paisagem. A dinâmica da CL, conforme ilustrado na **Figura 10**, evidencia um recuo significativo ao longo do período analisado. A área ocupada por essa formação passou de 70,85% em 1987 para 59,07% em 2024, o que representa uma perda acumulada de 78,951 km<sup>2</sup> e uma taxa média anual de decréscimo de -0,46%. Esse processo não apenas reduz a extensão da vegetação nativa como altera diretamente a estrutura da paisagem, entendida como a organização espacial dos fragmentos de vegetação e sua relação com os usos do solo ao redor.

Compreender a estrutura das paisagens exige considerar os processos que promovem suas transformações, bem como os elementos que as compõem, sua temporalidade e a história de uso e ocupação. À medida que a paisagem se torna mais antiga e sofre menor interferência

de processos antrópicos negativos, tende a apresentar estruturas mais complexas e estáveis. A dinâmica da paisagem é contínua, pois elementos se acumulam, interagem e se reorganizam, promovendo gradualmente a formação de novas configurações ou mesmo a conversão de uma paisagem em outra (Seabra et al., 2013).

Nesse contexto, os mapas de transição apresentados nas **Figuras 11 e 12** oferecem uma representação clara da dinâmica funcional da paisagem, ao distinguirem diferentes estados de alteração da cobertura vegetal. As classes mapeadas permitem identificar áreas de supressão definitiva, convertidas em usos antrópicos; áreas degradadas, com perda parcial de cobertura vegetal; e áreas em regeneração, que indicam o retorno progressivo da vegetação nativa. Embora a cartografia de dinâmicas de superfície possa gerar zonas de transição e sobreposição de classes, o modelo adotado neste estudo se mostra eficaz na compreensão dos processos de conversão da paisagem, possibilitando a leitura dos ciclos de degradação e regeneração ao longo do tempo.

Figura 10 - Estados de mudanças da caatinga lenhosa no período de 1987 a 2024.



Fonte: O autor

Figura 11 - Dinâmica e alteração da caatinga no período de 1987 a 2005.

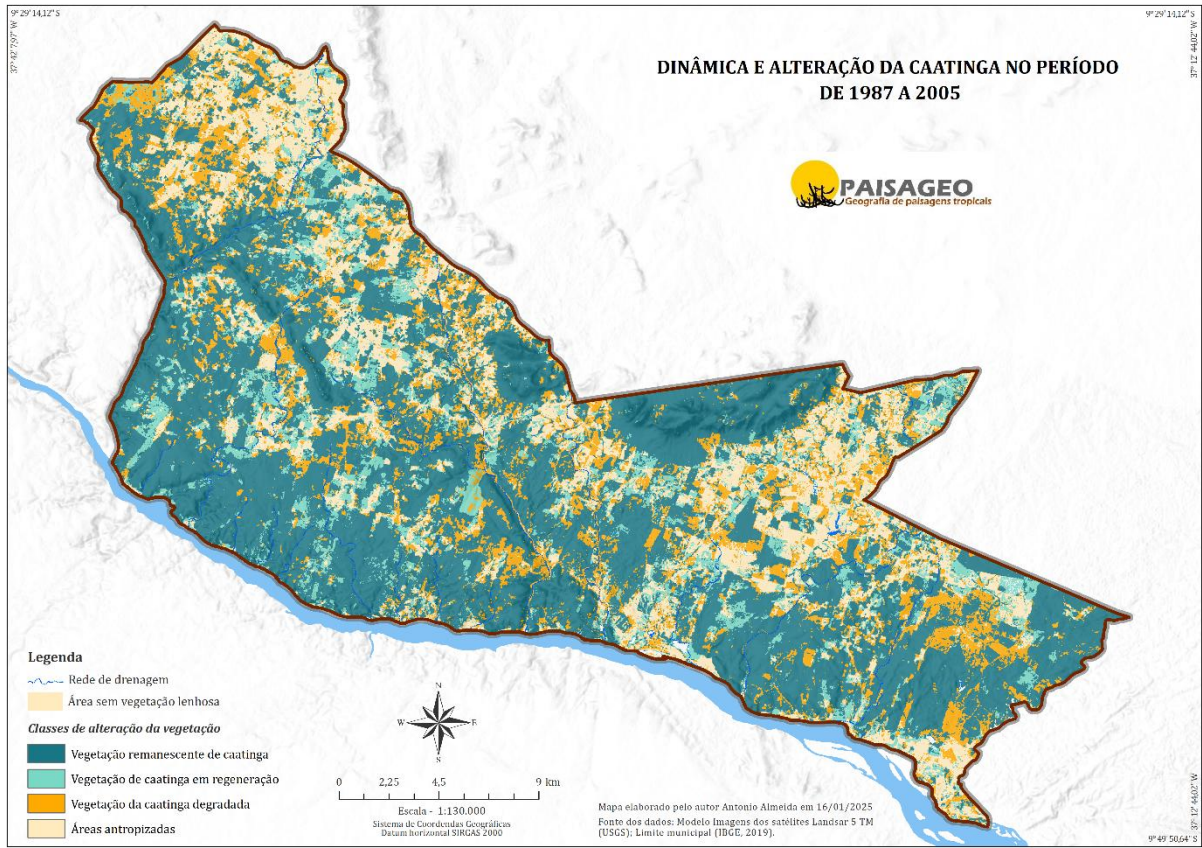
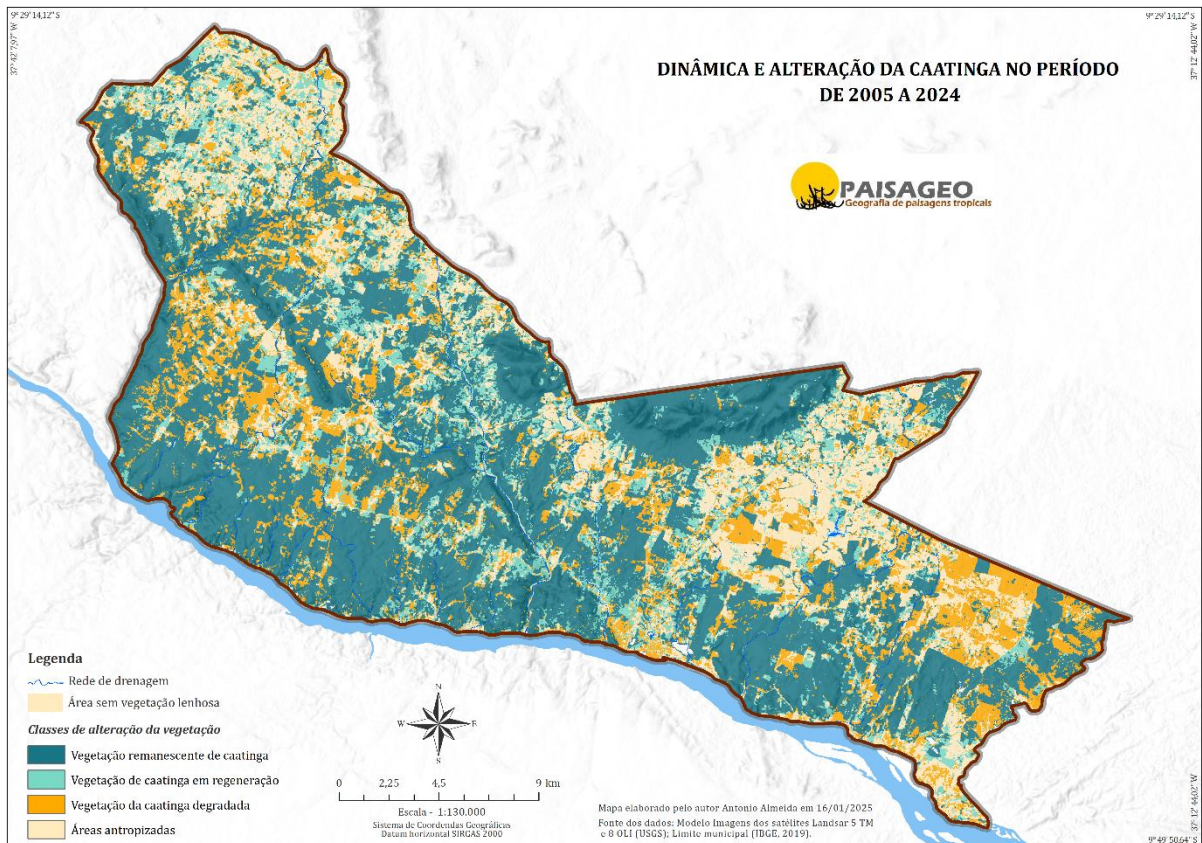


Figura 12 - Dinâmica e alteração da caatinga no período de 2005 a 2024.





A classificação dinâmica da vegetação adotada contribui, para demonstrar que a paisagem pode ser um indicador pertinente dos processos na interface entre os sistemas naturais e sociais. A leitura das classes dinâmicas permite inferir o estado atual do geossistema em relação à sua condição original, ao mesmo tempo em que revela as forças e tensões entre os agentes atuantes.

À medida que essas áreas remanescentes passam a ter uma dinâmica de alteração de seu estado natural, acontece o desmatamento da vegetação e o aumento de novos usos, sejam elas pela agropecuária, áreas urbanas ou mesmo terras sem cobertura alguma. Em contrapartida, quando passar acontece a uma dinâmica de regeneração, novas áreas de vegetação de caatinga surgem, especialmente em áreas de pousio, com extensos extratos de sucessão, que poderão eventualmente formar florestas secundárias.

A partir desses indicadores dinâmicos, é possível realizar uma análise quantitativa dos parâmetros geoambientais associados às alterações na cobertura vegetal, permitindo identificar quais classes melhor expressam a realidade geoambiental área de estudo. Os dados apresentados na **Tabela 3** evidenciam a progressiva alteração da cobertura vegetação da Caatinga entre os dois períodos analisados, refletindo um cenário marcado por fortes pressões antrópicas.

Tabela 3 - alteração das classes dinâmicas nos períodos: 1987-2005 e 2005-2024.

Classes Dinâmicas	1987 - 2005		2005 - 2024	
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%
Vegetação remanescente	370,77	55,36	327,30	48,87
Vegetação regenerada	65,27	9,75	57,03	8,52
Vegetação degradada	114,30	17,06	146,50	21,87
Áreas antropizadas	119,39	17,83	138,90	20,74
<b>Total</b>	<b>669,73</b>	<b>100,00</b>	<b>669,73</b>	<b>100,00</b>

Fonte: O autor

Observa-se uma redução expressiva da classe de vegetação remanescente, que passou de 370,77 km<sup>2</sup> (55,36%) no primeiro período para 336,78 km<sup>2</sup> (50,28%) no segundo, indicando a contínua perda das áreas de maior integridade ecológica. Paralelamente, a classe de vegetação degradada apresentou crescimento significativo, de 114,30 km<sup>2</sup> (17,06%) para 140,66 km<sup>2</sup> (21,00%), o que sinaliza que a vegetação passou por estágios sucessionais mais empobrecidos, normalmente com a presença de indivíduos menos lenhosos, caracterizados pela predominância de espécies herbáceas e indivíduos arbustivos de menor porte.

Esse processo de degradação também se reflete no aumento das áreas antropizadas, que cresceram de 119,39 km<sup>2</sup> (17,83%) para 133,48 km<sup>2</sup> (19,93%) entre os dois períodos. O avanço

dessas áreas reforça a tese de que as pressões humanas não apenas reduzem a vegetação nativa remanescente, mas também contribuem diretamente para sua degradação estrutural e funcional. Mesmo a vegetação em regeneração, que poderia indicar uma tendência de recuperação, apresentou um leve decréscimo em termos percentuais, passando de 9,75% para 8,79%, o que sugere que os processos regenerativos têm sido insuficientes para compensar a perda contínua da cobertura natural.

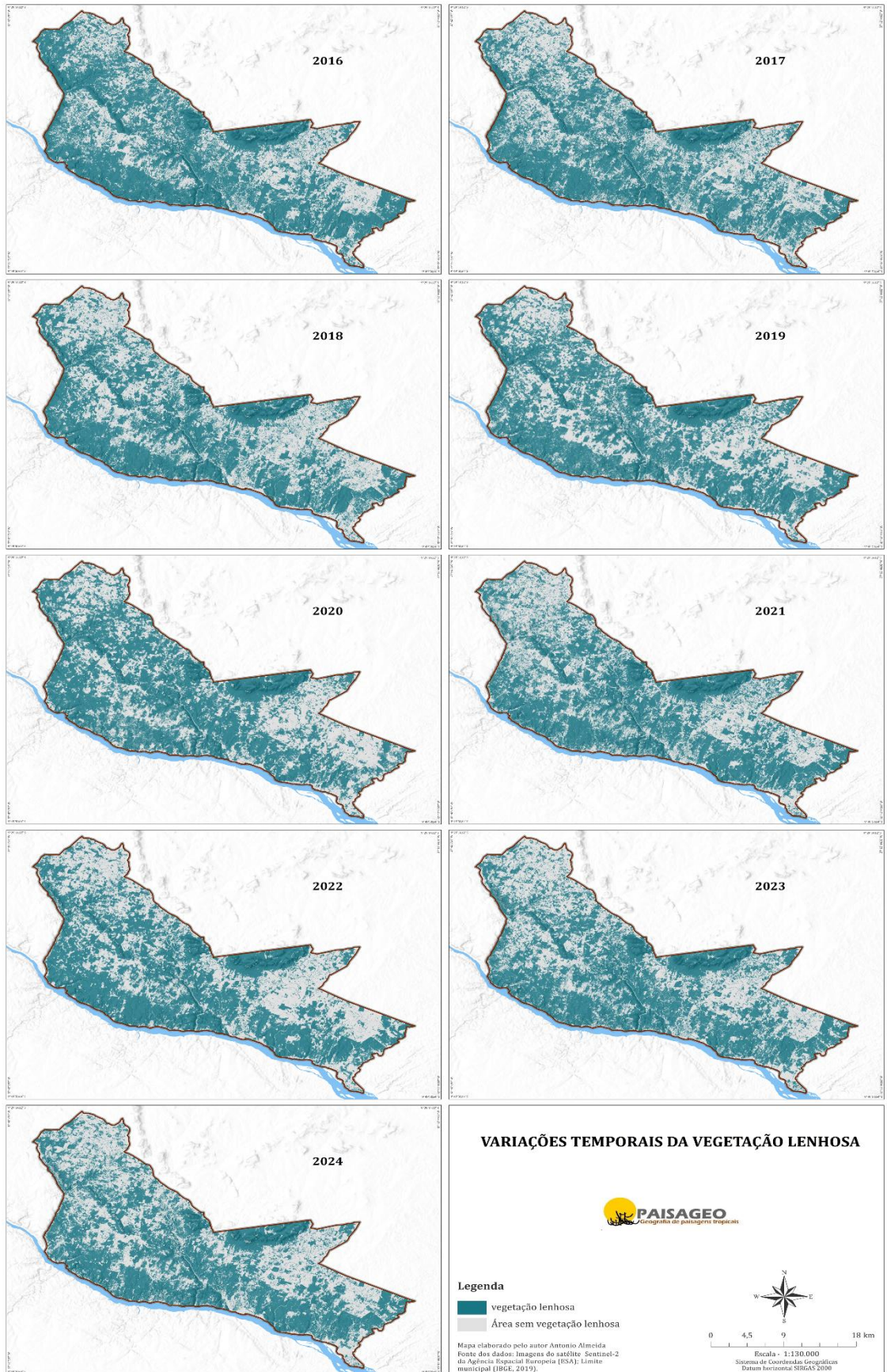
### 3.5 AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA CAATINGA LENHOSA NO RECORTE TEMPORAL DA PESQUISA

A trajetória de transformação da paisagem da Caatinga, evidenciada na análise dos dados históricos (1987, 2005 e 2024), demonstrou que a vegetação lenhosa tem sofrido alterações significativas em função da intensificação das perturbações antrópicas. O avanço das atividades agropecuárias, aliado à pressão histórica sobre os recursos naturais, resultou na redução contínua da cobertura de Caatinga Lenhosa (CL), na ampliação das áreas degradadas e na fragmentação crescente dos remanescentes florestais.

Com base nesse contexto, a presente seção se concentra na análise específica da vegetação lenhosa da Caatinga durante o recorte temporal da pesquisa (2016 a 2024). Este intervalo constitui um elemento chave dos objetivos do estudo que visa explorar a cobertura vegetal com um nível de precisão e resolução espacial aprimorada. O emprego da capacidade avançada do satélite Sentinel-2, conforme detalhado na metodologia na seção "**Extração da vegetação da vegetação lenhosa e definição do recorte temporal da pesquisa**", permitiu realizar um mapeamento detalhado da cobertura vegetal, alinhando-se diretamente ao propósito central da pesquisa.

A análise da cobertura vegetal entre 2016 e 2024 revela uma tendência de diminuição da vegetação lenhosa, acompanhada por variações interanuais fortemente influenciadas por ações antrópicas (**Figura 13**). Nota-se uma distribuição espacial desigual, com fragmentos mais preservados em determinadas regiões e expansão de áreas degradadas em outras, refletindo a intensidade das pressões humanas sobre a paisagem.

Figura 13 - Evolução da vegetação Lenhosa da Caatinga no período de 2016 a 2024.



Fonte: O autor

No início do período analisado, a área ocupada por vegetação lenhosa era de 437,62 km<sup>2</sup>, representando 63,53% da cobertura vegetal da região. Contudo, ao longo dos anos, observa-se uma diminuição gradual dessa área, que chegou a 384,33 km<sup>2</sup> (55,79% da área) em 2024. Esses valores servem como linha de base para compreender os processos recentes de perda ou permanência da vegetação. A acima ilustra de forma contínua essa evolução anual, destacando visualmente os padrões espaciais de retração e manutenção da cobertura lenhosa, permitindo identificar com clareza as áreas de maior estabilidade e as zonas mais afetadas por dinâmicas de degradação.

Complementarmente, a análise quantitativa dos dados reforça essas tendências observadas nos mapas. A **tabela 4** apresenta a variação da área ocupada por vegetação lenhosa ao longo do período, demonstrando uma trajetória geral de declínio, embora marcada por oscilações. A maior perda absoluta ocorreu entre 2016 e 2017, com uma redução de 31,40 km<sup>2</sup>, correspondente a -4,56%, possivelmente relacionada ao avanço de atividades agropecuárias. Em contrapartida, 2019 apresentou um comportamento atípico, com aumento de 19,65 km<sup>2</sup> (2,85%), o que pode estar associado à regeneração natural de áreas anteriormente em pousio.

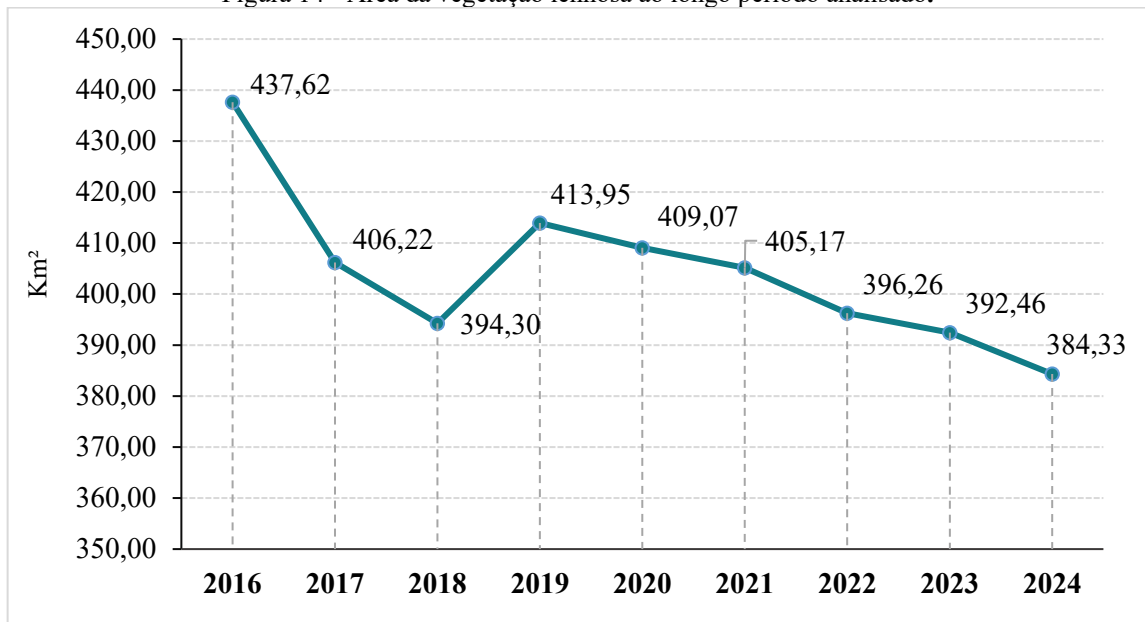
Tabela 4 - Variação dos valores da cobertura da vegetação lenhosa da caatinga

Ano	Caatinga Lenhosa (Km <sup>2</sup> )	% Caatinga Lenhosa	Variação (Km <sup>2</sup> )	% Da Variação
2016	437,62	63,53	0,00	0,00
2017	406,22	58,97	-31,40	-4,56
2018	394,30	57,24	-11,92	-1,73
2019	413,95	60,09	19,65	2,85
2020	409,07	59,38	-4,88	-0,71
2021	405,17	58,82	-3,91	-0,57
2022	396,26	57,52	-8,90	-1,29
2023	392,46	56,97	-3,80	-0,55
2024	384,33	55,79	-8,13	-1,18

Fonte: O autor

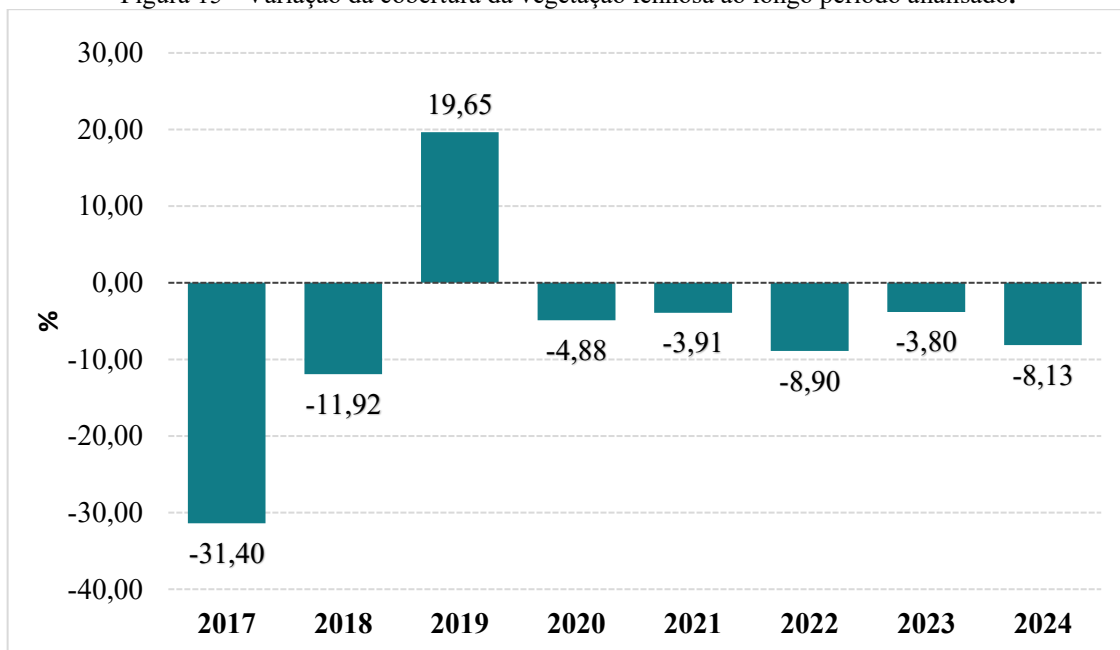
No entanto, essa tendência de recuperação não se manteve nos anos seguintes. De 2019 a 2024, a cobertura vegetal lenhosa voltou a diminuir de forma contínua, atingindo 384,33 km<sup>2</sup> (55,79%) ao final do período. A média de redução anual no intervalo total foi de aproximadamente -1,29%, com destaque para os núcleos de maior perda situados nas porções Noroeste e Leste da área analisada. Para melhor visualização dessa dinâmica quantitativa da vegetação lenhosa, os dados consolidados da área total e intensidade das variações são ilustrados nas **Figuras 14 e 15**, respectivamente.

Figura 14 - Área da vegetação lenhosa ao longo período analisado.



Fonte: O autor

Figura 15 - Variação da cobertura da vegetação lenhosa ao longo período analisado.



Fonte: O autor

### 3.6 PADRÕES ESPACIAIS DE FRAGMENTAÇÃO DA VEGETAÇÃO LENHOSA

A fragmentação da vegetação lenhosa na Caatinga expressa um processo contínuo de reconfiguração da paisagem, resultado do acúmulo de pressões humanas que atuam sobre a cobertura vegetal. Essas transformações têm implicações diretas na estrutura espacial dos remanescentes florestais, reveladas por métricas como o aumento do número de manchas, a

redução da área dos fragmentos, o distanciamento entre eles e a intensificação dos efeitos de borda. Ao analisar esses padrões, é possível compreender como a ação antrópica remodela a paisagem e aprofunda os níveis de vulnerabilidade ecológica nos ecossistemas da Caatinga.

### 3.6.1 Perturbações Antrópicas e Seus Efeitos na Fragmentação da Paisagem

Os processos de fragmentação observados na Caatinga são resultado direto de perturbações antrópicas que vêm se intensificando ao longo do tempo e reconfigurando a paisagem. Práticas como desmatamento voltado à agropecuária, a expansão de áreas urbanizadas, a abertura de estradas e o uso recorrente do fogo como instrumento de manejo atuam de forma articulada na descontinuidade dos remanescentes florestais, acentuando a degradação dos ecossistemas naturais (Ribeiro et al., 2015; Antongiovanni et al., 2020).

Essas intervenções desencadeiam modificações profundas na estrutura da vegetação, reduzindo o tamanho dos fragmentos florestais, ampliando suas bordas expostas e enfraquecendo a conectividade ecológica, fator determinante para a manutenção da biodiversidade e da funcionalidade do sistema (Andrén, 1994; Ribeiro et al., 2009). À medida que tais perturbações se acumulam e interagem, intensificam-se os processos de degradação ambiental, sobretudo em fragmentos menores e mais vulneráveis.

Nesse contexto, compreender a natureza e os padrões espaciais dessas pressões se torna essencial para interpretar os resultados obtidos por meio das métricas de fragmentação, as quais atuam como indicadores sensíveis das transformações impostas à paisagem (Neel et al., 2004). Identificar os vetores responsáveis por essas alterações permite não apenas avaliar os níveis de impacto, mas também subsidiar estratégias de conservação e restauração voltadas à sustentabilidade dos remanescentes florestais da Caatinga.

#### 3.6.1.1 Principais Causas de Perturbações Antrópicas

As alterações na cobertura vegetal da Caatinga observadas na área de estudo estão diretamente associadas à intensificação de atividades humanas que modificam o uso da terra, promovendo perturbações e a fragmentação da vegetação lenhosa nativa. Entre os principais vetores de perturbação identificados ao longo da série analisada, destacam-se:

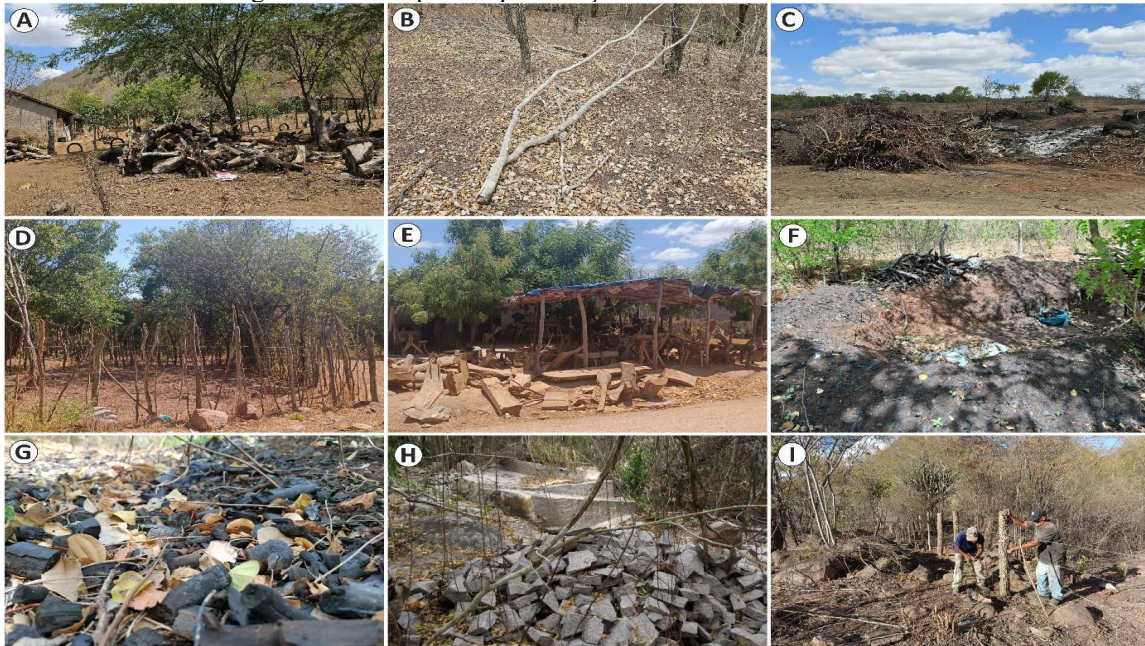
- **Expansão agropecuária e uso intensivo da terra:** A conversão de áreas nativas em pastagens e lavouras, aliada ao uso contínuo e degradante do solo, é o principal fator de

desmatamento e de fragmentação da vegetação. Essa dinâmica promove a simplificação estrutural dos ecossistemas, o empobrecimento do solo e a redução da biodiversidade.

- **Queimadas e fogo recorrente:** Utilizadas para manejo de pastagens e limpeza de áreas, as queimadas causam perda de biomassa, degradação do solo e interrupção dos ciclos ecológicos, especialmente quando ocorrem de forma frequente e não controlada.
- **Exploração vegetal (lenha e desmatamento seletivo):** A retirada de espécies lenhosas para produção de carvão, lenha ou cercas compromete a estrutura ecológica dos fragmentos, reduz a diversidade funcional da vegetação e favorece espécies oportunistas.
- **Expansão urbana e abertura de vias:** A urbanização desordenada, aliada à construção de estradas vicinais, promove a supressão direta da vegetação nativa e fragmenta o habitat, criando barreiras artificiais à conectividade ecológica.
- **Pastoreio extensivo:** A pressão constante de rebanhos em áreas abertas ou em recuperação dificulta a regeneração natural, compacta o solo e contribui para o avanço da degradação.
- **Exploração mineral irregular:** Ainda que pontual, a mineração sem controle ambiental impacta diretamente áreas de vegetação nativa, gerando destruição de habitats, poluição e alterações irreversíveis no relevo.

Esses vetores, muitas vezes atuando de forma combinada e persistente, reforçam a pressão sobre os fragmentos de vegetação lenhosa, tornando-os cada vez mais vulneráveis à degradação ecológica. A intensificação dessas atividades compromete a conectividade ecológica e amplia a exposição dos remanescentes florestais aos efeitos de borda e à supressão. A figura a seguir ilustra exemplos concretos dessas perturbações na área de estudo, evidenciando como as ações antrópicas se manifestam diretamente na paisagem e contribuem para a dinâmica de fragmentação da Caatinga.

Figura 16 - Exemplos de perturbações detectadas na área de estudo



Legenda: Os exemplos são: A) Acúmulo de lenha para uso doméstico; B) Corte seletivo de madeira para produção de cerca; C) Área de caatinga recém desmatada/queimada para manejo do solo; D) Uso de espécies lenhosa para construção de curral; E) Acúmulo de lenhas para atividade de artesanato e marcenaria rústica; F) Caieiras para produção de carvão vegetal; G) Resquícios de carvão vegetal; H) Área irregular de extração mineral; I) Instalação de cercas com espécies nativas recém cortada. Fonte: O autor

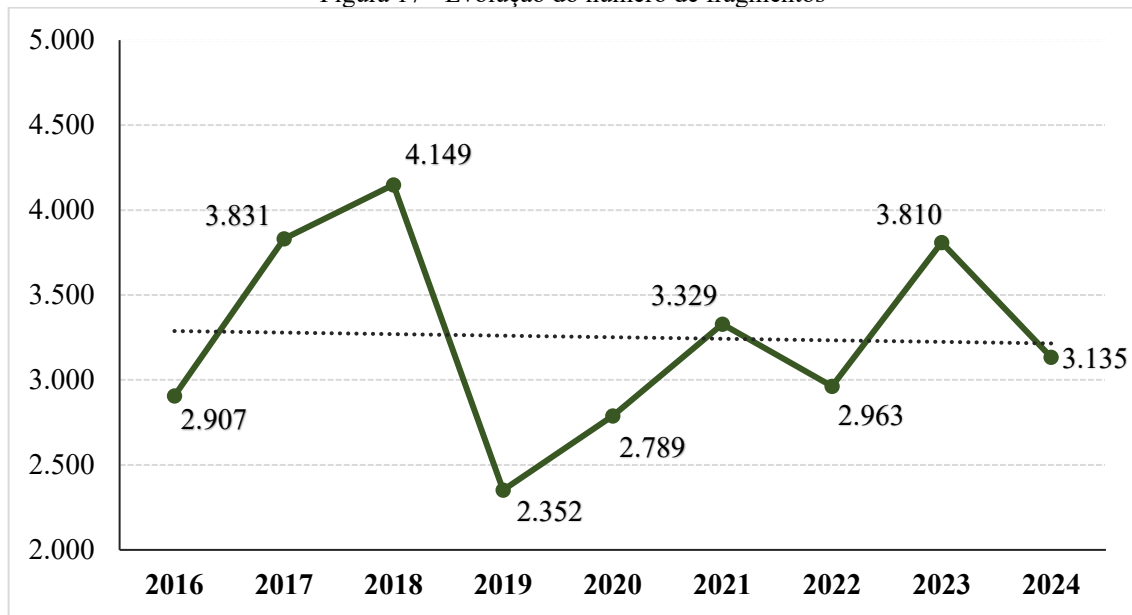
### 3.6.2 Avaliação da Fragmentação da Vegetação Lenhosa com Base em Métricas da Paisagem

A avaliação da fragmentação da vegetação lenhosa foi realizada com base em indicadores espaciais que permitem mensurar os efeitos das pressões antrópicas sobre a estrutura da paisagem. A análise das métricas, por meio do número de manchas, da área de vegetação, da distância média entre fragmentos e da densidade da borda média revelou transformações significativas entre 2016 e 2024, refletindo mudanças tanto na dinâmica quanto na organização espacial da paisagem ao longo do tempo

Conforme ilustrado na **Figura 17**, houve um aumento significativo no número de fragmentos em determinados períodos, como de 2016 para 2017, quando o número de manchas subiu de 2.907 para 3.831, e posteriormente para 4.149 em 2018. Essa tendência de crescimento coincidiu com uma redução acentuada na área total de vegetação, que caiu de 437,62 km<sup>2</sup> em 2016 para 406,22 km<sup>2</sup> em 2017 e 391,47 km<sup>2</sup> em 2018 (conforme mostrado na Figura 14). Essa correlação indica que grandes blocos vegetais foram fragmentados em manchas menores, evidenciando um processo de intensa fragmentação.



Figura 17 - Evolução do número de fragmentos

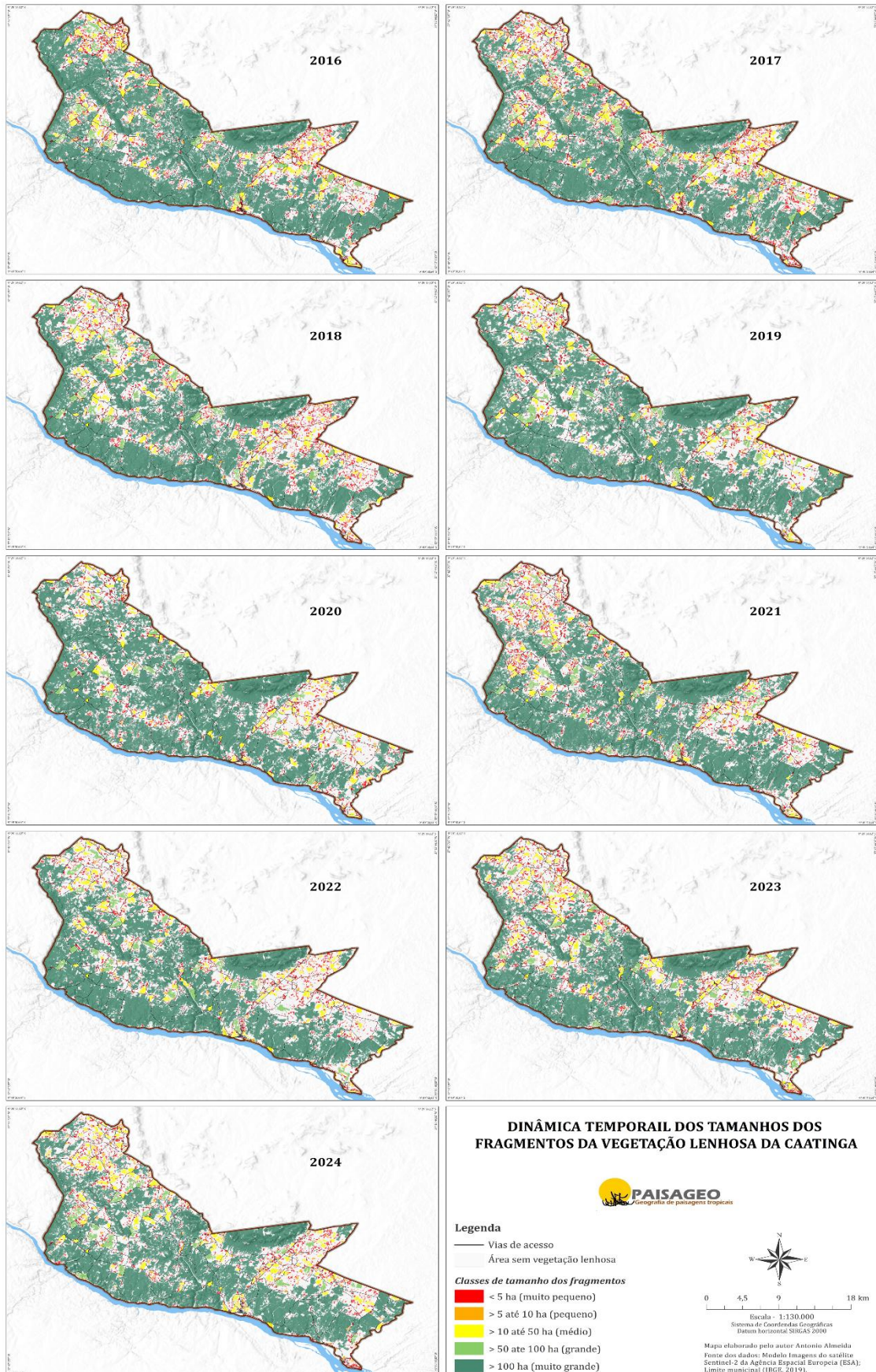


Fonte: O autor

Essa tendência é visível nos mapas da dinâmica temporal dos tamanhos dos fragmentos (**Figura 18**), nos quais áreas anteriormente contínuas, principalmente no centro-norte e leste do território, passam a ser dominadas por fragmentos muito pequenos ( $< 5$  ha), destacados em vermelho. Nota-se que essas áreas altamente fragmentadas coincidem com a malha de estradas presente no território, sugerindo que as vias de acesso atuam como vetores de perturbação, ao facilitar tanto a ocupação antrópica quanto a fragmentação da vegetação lenhosa da Caatinga. Esse papel das estradas como promotoras de desmatamento e perturbações antrópicas crônicas já foi amplamente descrito na literatura, com destaque para sua capacidade de criar novas bordas e ampliar o acesso humano em áreas previamente contínuas (Laurance et al., 2009; Santos e Tabarelli, 2002).

Outro aspecto relevante é a análise da distância média entre os fragmentos e da densidade da borda média, conforme demonstrado no **Tabela 5**. A distância média entre os fragmentos aumentou de 18,11 m em 2016 para 25,06 m em 2018, refletindo um isolamento crescente entre as manchas de vegetação. Esse isolamento tende a dificultar ou até mesmo interromper o fluxo de organismos entre os fragmentos, prejudicando o acesso aos recursos, alterando interações ecológicas e favorecendo extinções locais (Pueyo e Alados, 2007; Andrén, 1994).

Figura 18 - Dinâmica dos tamanhos dos fragmentos da vegetação lenhosa



Fonte: O autor

Tabela 5 - dados da distância média entre os fragmentos e da densidade da borda média

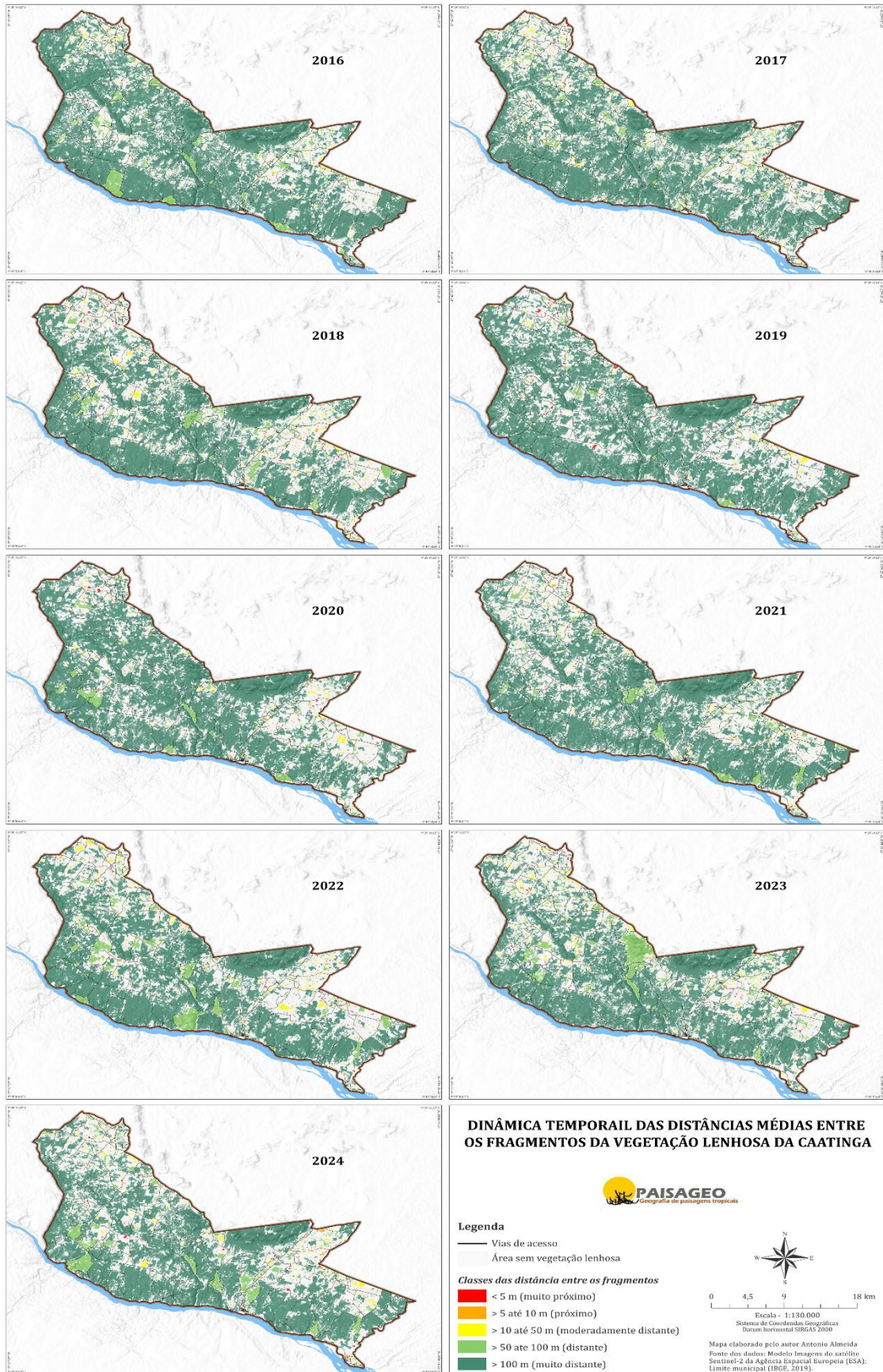
<b>Ano</b>	<b>Distância Média Dos Fragmentos (m)</b>	<b>Densidade Da Borda Média (m/ha)</b>
<b>2016</b>	18,11	1166,01
<b>2017</b>	18,72	1093,47
<b>2018</b>	25,06	1139,04
<b>2019</b>	17,42	1342,75
<b>2020</b>	19,73	1360,14
<b>2021</b>	20,02	1191,74
<b>2022</b>	26,55	1234,74
<b>2023</b>	22,86	1474,66
<b>2024</b>	22,37	1317,37

Fonte: O autor

Os Mapas da dinâmica temporal das distâncias médias entre os fragmentos (**Figura 19**) mostram essa evolução espacialmente, com o surgimento de áreas classificadas como “moderadamente distantes” (> 50 m) e “distantes” (> 100 m), principalmente nas regiões mais antropizadas e com maior densidade de estradas. Com base nos dados analisados, verifica-se que fragmentos com distâncias médias superiores a 50 metros tendem a ser mais suscetíveis à supressão, evidenciando maior vulnerabilidade em contextos de isolamento espacial. Esse padrão se alinha às observações de que paisagens altamente fragmentadas aumentam os efeitos da perda de habitat, sobretudo em fragmentos pequenos e isolados (Ribeiro et al., 2009).

Ao mesmo tempo, a densidade da borda média apresentou aumento significativo em anos como 2019 (1.342,75) e 2023, quando atingiu o valor mais alto da série, com 1.474,66. Esses aumentos indicam maior exposição dos fragmentos a efeitos de borda, o que acentua a vulnerabilidade ecológica (Murcia, 1995; Woodroffe e Ginsberg, 1998). As bordas expostas também se concentram em áreas adjacentes às estradas, ampliando os efeitos de borda e intensificando os impactos da infraestrutura viária.

Figura 19 - Dinâmica temporal das distâncias média entre os fragmentos da vegetação lenhosa



Fonte: O autor

A partir de 2019, observa-se uma inflexão importante no padrão de fragmentação da paisagem. Esse ano registra o menor número de manchas (2.352) e, coincidentemente, a menor distância média entre fragmentos (17,42 m) de toda a série analisada (ver Quadro 5 e Figura 19). Tal configuração sugere que muitos fragmentos pequenos foram suprimidos, enquanto os remanescentes se concentraram em áreas adjacentes, reduzindo o espaçamento entre eles. Nos mapas, essa reorganização espacial é visível na região sul e sudeste do território, onde a concentração de fragmentos maiores indica uma possível consolidação de áreas menos afetadas, ainda assim, em muitos casos, essas áreas estão inseridas próximas à malha de vias, permanecendo vulneráveis.

Contudo, mesmo com essa reorganização, os fragmentos mantiveram alta densidade de bordas, o que confirma sua fragilidade estrutural e reforça sua exposição às perturbações ambientais. Nos anos seguintes, a distância média volta a crescer, atingindo 26,55 m em 2022, indicando um novo ciclo de fragmentação mais dispersa e isolada, o que compromete ainda mais a conectividade ecológica e a resiliência da vegetação lenhosa da Caatinga.

Em 2024, os mapas mostram o avanço dos fragmentos muito pequenos (< 5 ha), concentrados principalmente ao longo das vias de acesso. Também se destacam novas manchas isoladas no Nordeste, indicando maior distanciamento entre os fragmentos. A alta densidade de bordas evidencia um estágio crítico de fragmentação, no qual fragmentos menores estão mais vulneráveis e com baixa capacidade de regeneração, o que é consistente com estudos que demonstram que comunidades vegetais sob pressão antrópica tendem a ser substituídas por espécies oportunistas e adaptadas à degradação (Sagar et al., 2003; Ribeiro-Neto et al., 2016).

A análise também destaca que os fragmentos com áreas inferiores a 5 hectares são os mais suscetíveis à supressão. Esses fragmentos apresentam uma maior proporção de bordas em relação à sua área total, o que os torna extremamente vulneráveis a pressões ambientais e antrópicas (Murcia, 1995). O desaparecimento desses pequenos fragmentos ao longo dos anos é visível, por exemplo, na queda abrupta no número de manchas entre 2018 e 2019 (de 4.149 para 2.352), o que possivelmente reflete a eliminação desses fragmentos mais frágeis.

Conforme demonstrado no **Tabela 6**, os fragmentos com menos de 5 ha compõem, de forma consistente, mais de 90% do total de manchas em todos os anos analisados, evidenciando sua dominância numérica, mas também sua instabilidade estrutural.

Tabela 6 - Classes de tamanhos dos fragmentos da vegetação lenhosa

Ano	Nº de Manchas	Classes de Tamanhos				
		< 5 ha	de 5 a 10 ha	de 10 a 50 ha	de 50 a 100 ha	> 100 ha
2016	2.907	2636	91	102	21	57
2017	3.831	3519	108	124	27	53
2018	4.149	3890	76	101	22	60
2019	2.352	2099	77	97	22	57
2020	2.789	2547	79	88	15	60
2021	3.329	3079	81	86	23	60
2022	2.963	2711	72	94	23	63
2023	3.810	3518	97	114	22	59
2024	3.135	2844	101	108	24	58

Fonte: O autor

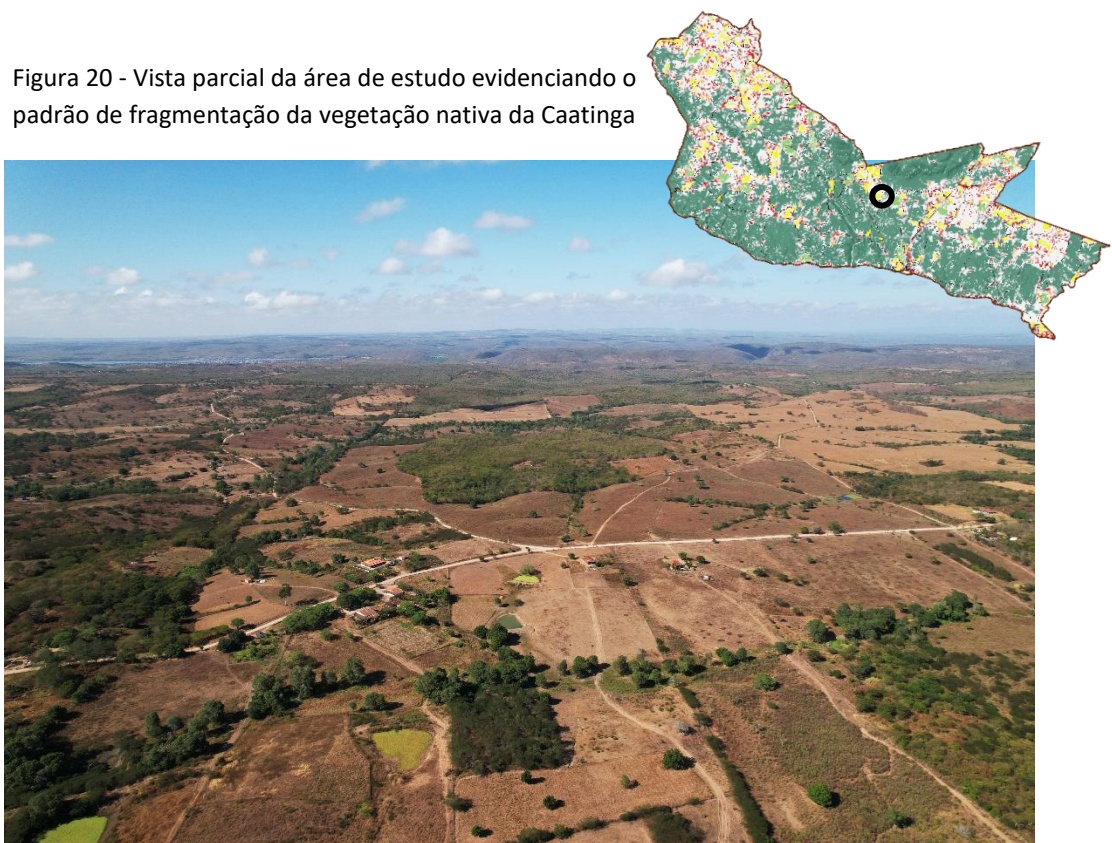
A redução de 1.791 manchas dessa categoria entre 2018 e 2019 demonstra que ela é a mais afetada em contextos de supressão. Embora tenha havido um novo aumento no número de fragmentos < 5 ha nos anos seguintes, esse crescimento parece estar mais relacionado à intensificação da fragmentação do que à regeneração ecológica. Assim, a recorrência e a instabilidade desses fragmentos reforçam seu papel como indicador sensível da dinâmica de degradação da vegetação lenhosa da Caatinga.

Dando continuidade a essa dinâmica, entre 2019 e 2024, observa-se uma relação inversa importante entre o número de manchas e a área de cobertura vegetal. Em 2019, havia 2.352 manchas e uma cobertura de 413,95 km<sup>2</sup>. A partir desse ano, o número de manchas passou a crescer de forma constante, ao passo que a área de cobertura vegetal entrou em declínio contínuo, passando de 413,95 km<sup>2</sup> (2019) para 384,33 km<sup>2</sup> em 2024 (ver figuras 8 e 10). Essa trajetória inversa reforça a interpretação de que o aumento do número de manchas não representa uma regeneração, mas sim uma ampliação da fragmentação, com perda de grandes fragmentos e formação de pequenos remanescentes, muitos dos quais abaixo de 5 ha, no qual são mais vulneráveis à supressão.

A relação entre as métricas deixou claro que o aumento no número de manchas reflete diretamente o avanço da fragmentação da vegetação, enquanto a redução na área total e o aumento da distância média entre fragmentos indicam perda de conectividade. Ao mesmo tempo, a elevação da densidade da borda média ressalta a maior vulnerabilidade dos fragmentos, especialmente os menores, que não possuem resiliência suficiente para resistir às

pressões ambientais e humanas (Smart et al., 2006). Em todas essas dinâmicas, a rede de estradas desempenha papel central, funcionando como eixo estruturante da fragmentação, ao mesmo tempo em que atua como limite físico e vetor de perturbação antrópica (Barboza et al., 2016; Leal et al., 2014).

Esse padrão pode ser observado de forma clara na **Figura 20**, que apresenta uma vista aérea de parte da área de estudo, onde a vegetação nativa aparece isolada em pequenos blocos e bastante fragmentada pela malha de estradas vicinais.



Fonte: O autor

### 3.7 CONCLUSÃO

A análise integrada da cobertura vegetal da Caatinga ao longo das últimas décadas evidencia um cenário de profundas transformações impulsionadas, sobretudo, por pressões antrópicas crônicas. A trajetória histórica de uso da terra revela a substituição contínua da vegetação lenhosa nativa por áreas antropizadas, refletindo um processo de degradação estrutural e funcional da paisagem.

A redução significativa da Caatinga Lenhosa, tanto em extensão quanto em conectividade, demonstra o avanço de práticas produtivas que promovem a simplificação ecossistêmica e destacam a fragmentação dos remanescentes florestais. A intensificação dessas

pressões tem resultado na formação de uma paisagem marcada por pequenos fragmentos isolados, cada vez mais afastados entre si, que dificulta os processos de regeneração natural e aumenta a vulnerabilidade ecológica.

As métricas analisadas demonstram, com clareza, a correlação entre a intensificação do uso da terra e os padrões de fragmentação observados. O aumento no número de fragmentos, sobretudo aqueles com menos de 5 hectares, está associado à perda de grandes blocos vegetais, resultando em uma paisagem mais desconectada e exposta a distúrbios. Além disso, a distribuição espacial das perturbações revela um padrão não aleatório de fragmentação, concentrado principalmente nas proximidades de estradas e áreas de atividades agropecuárias.

Por fim, os dados analisados confirmam que os processos de fragmentação e supressão vegetal não apenas reduzem a extensão da cobertura lenhosa da Caatinga, mas também comprometem sua resiliência frente às perturbações externas. A predominância de fragmentos pequenos e isolados, com estrutura frágil e baixa capacidade de regeneração, sinaliza a urgência de estratégias de conservação e restauração que considerem a conectividade ecológica como um eixo central para a sustentabilidade da paisagem semiárida.



## 4 DIFERENCIAÇÃO DE FORMAÇÕES DE CAATINGA E ESTADOS DINÂMICOS DA VEGETAÇÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

A Caatinga, um bioma adaptado à semiaridez, pode ser interpretada como um geossistema no sentido proposto por Sochava (1978), onde sua organização, os processos internos e as dinâmicas emergem da interação entre elementos naturais e a influência humana. Suas diferentes tipologias vegetais, que variam desde formações arbustivas mais abertas até florestas arbóreas densas, refletem não apenas a capacidade de adaptação às condições climáticas, mas também as respostas às pressões exercidas pelas perturbações antrópicas, que ao passar do tempo, transforma o ambiente em paisagens cada vez mais antropizada (Rodríguez, 2004; Seabra, 2013).

Pesquisas feitas por Vasconcelos Sobrinho (1978), Andrade-Lima (1981) e Alves (2007), ressaltam que as dinâmicas das formações lenhosas da Caatinga são profundamente dependentes das interações entre os fatores ecológicos e humanos, corroborando o papel das perturbações antrópicas nas alterações das características funcionais e estruturais da caatinga.

Deste modo, a Caatinga, tornar-se um sistema dinâmico e integrado, onde a interação entre os fatores naturais e antrópicos determina as suas respostas às pressões externas (Turner et al., 2001). Assim, as paisagens antropizadas surgem como versões descaracterizadas de sistemas naturais primitivos, culminando em novas configurações espaciais, coexistindo entre processos ecológicos e ações humanas (Seabra, 2013).

A análise das dinâmicas das tipologias da Caatinga encontra respaldo nos conceitos ecológicos de sucessão, estabilidade e perturbação, que oferecem uma base teórica para compreender as mudanças na composição e estrutura das comunidades vegetais ao longo do tempo (Odum, 1969; 1988). Esses conceitos apresentam forte similaridade com os estados dinâmicos dos geossistemas propostos por Sochava (1978), que classifica as paisagens em fâcies nativas, quase-nativas, seriais e antropogeneticamente derivadas, no qual oferecem uma estrutura teórica para entender a interação entre a vegetação, os fatores ambientais e as ações antrópicas.

A integração entre os conceitos ecológicos e o modelo de estados dinâmicos de Sochava permite compreender como fatores naturais e antrópicos influenciam a estrutura e dinâmica da vegetação da Caatinga, conforme o funcionamento dos geossistemas. Nos estados nativos a estabilidade está ligada ao clímax ecológico, típico dos estados nativos, onde a vegetação se

encontra em equilíbrio com o ambiente e livre de perturbações intensas. Já os estados quase-nativos representam situações com perturbações moderadas, que preservam parte das características originais da vegetação, embora apresentem uma redução na estabilidade ecológica.

Nos estados seriais, predominam os processos de sucessão ecológica, geralmente vinculados ao abandono de áreas ou à regeneração após distúrbios ambientais, sendo marcados por fases iniciais ou intermediárias da sucessão. Em contraste, os estados derivados indicam perturbações antrópicas contínuas, que impedem a regeneração e mantêm a vegetação em um estado alterado.

Dentro desse contexto, os processos de sucessão ecológica desempenham papel central nos estados seriais, pois refletem trajetórias de comunidades vegetais sujeitas à degradação e posterior regeneração (Sochava, 1978). Esses estados estão diretamente associados aos estágios de clímax, subclímax e disclímax descritos por Clements (1936), os quais expressam diferentes níveis de estabilidade ecológica. Já estágio de clímax representa o auge da sucessão, com máxima complexidade estrutural e funcional, marcado pelo equilíbrio dinâmico entre espécies e ambiente.

Logo o subclímax ocorre quando fatores limitantes, como perturbações antrópicas ou variações ambientais, impedem a vegetação de atingir plenamente o clímax (Dajoz, 1973; Odum, 1988; Martins e Martins, 2020). Embora relativamente estável, o subclímax apresenta menor resiliência ecológica e maior vulnerabilidade a novas perturbações. Por outro lado, o disclímax antrópico resulta de perturbações intensas e recorrentes, como o desmatamento e o uso inadequado do solo, que reorganizam de forma contínua as comunidades vegetais, impedindo sua progressão natural na sucessão ecológica (Alves, 2007).

A partir dessa perspectiva sucessional, a Caatinga pode ser compreendida como um mosaico dinâmico de estados ecológicos, que refletem tanto processos de degradação quanto de regeneração e suas interações, influenciando diretamente a fisionomia da paisagem (Cavalcanti et al., 2022). Por meio dessa abordagem, a integração da visão sistêmica de Sochava (1978) com a ecologia funcional de Odum (1988), contribui para compreender como os processos de degradação e recuperação moldam continuamente a estrutura, a composição e o funcionamento da vegetação lenhosa da Caatinga.

Nesse sentido, o presente capítulo tem como objetivo analisar os processos e dinâmicas das tipologias da vegetação lenhosa da Caatinga, entre os anos de 2016 e 2023, com base na perspectiva dos estados dinâmicos ecológicos, a fim de compreender as trajetórias ecológicas decorrentes das interações entre perturbações antrópicas e fatores ambientais. A partir da

aplicação de uma metodologia integrada que combina tipologias fisionômicas e conceitos ecológicos de dinâmica da paisagem, pretende-se mapear as transições entre diferentes formações e compreender de que maneira as pressões antrópicas moldam a configuração atual da vegetação.

Partindo dessa abordagem, levanta-se a hipótese de que as perturbações antrópicas recorrentes são os principais vetores de transição entre as tipologias da Caatinga lenhosa, promovendo regressões estruturais e funcionais que mantêm grande parte da vegetação em estado ecológico de perturbação, dificultando sua sucessão a estágios mais avançados, como o clímax. Em contrapartida, regiões com menor pressão antrópica apresentam indícios de estabilização ou sucessão, revelando a resiliência potencial do ecossistema.

#### 4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A classificação e o mapeamento da vegetação da Caatinga por meio de sensoriamento remoto são desafios técnicos substanciais, principalmente devido à variabilidade sazonal e interanual na disponibilidade hídrica que influenciam diretamente a fenologia da vegetação.

A distribuição irregular das chuvas e a perda intensa de folhas durante períodos de estresse hídrico alteram drasticamente a aparência da vegetação, dificultando a definição de datas ideais para captação de imagens. Essas características são influenciadas pela presença e ausência de folhas que definem o grau de cobertura dos dosséis, tornando a resposta espectral um indicador sensível às condições da vegetação (Ponzoni et al., 2012).

Diante dessa complexidade, é crucial o uso de imagens de múltiplas datas ao longo do ano para capturar as fases seca e úmida e suas variações associadas à anos muito úmidos e de secas severas, garantindo a correta identificação das diversas tipologias da Caatinga.

A literatura apresenta várias classificações baseadas em abordagens biológicas, centradas em espécies individuais, até geossistêmicas, que consideram a interação da vegetação com fatores abióticos como solo e relevo (Andrade-Lima, Veloso, 1966; Andrade-Lima, 1981; Veloso, Góes Filho, 1982; Eiten, 1983; Rizzini, 1997; Chaves et al., 2008; IBGE, 2012; Cavalcanti, 2016).

Contudo, a vegetação da Caatinga é geralmente referida como heterogênea (Andrade-Lima, 1981), configurando um complexo vegetacional (Rizzini, 1997), incluindo desde indivíduos arbóreos formando um dossel contínuo até arbustos densos e estratos herbáceos, refletindo diversidade fisionômica (Rodal; Barbosa; Thomas, 2008; Queiroz et al, 2017). Essa

diversidade é ainda ampliada pelas transições graduais entre paisagens e a presença de enclaves de outros domínios florísticos (Mata Atlântica e Cerrado).

Em termos de fisionomia, parecem predominar florestas abertas e arbustais, sendo a presença de espinhos e acúleos um aspecto marcante, embora nem sempre presente (Rodin; Sochava, 1964; Andrade-Lima, 1981; Rizzini, 1997; Cavalcanti; Rafael; Souza, 2024). As espécies herbáceas, sobretudo as terófitas (ervas anuais) apesar de contribuírem de forma expressiva para a diversidade florística, têm participação estrutural reduzida, respondendo, em média, por apenas 25% da biomassa total (Araújo Filho et al., 2002). Sobre isso, Dansereau (1957, Cf. p.78-79) destaca que, do ponto de vista da flora, as formas de maior importância são fanerófitas e terófitas, enquanto que, em termos fisionômicos, a Caatinga é caracterizada como uma vegetação majoritariamente lenhosa (dominada por fanerófitos), tendo as terófitas menor expressão fisionômica.

Neste contexto, propõe-se uma nova metodologia para diferenciação de formações da Caatinga. São utilizados indicadores da estrutura vertical (altura) e da estrutura horizontal (cobertura) da vegetação, seguindo classificações anteriores (Dansereau, 1957; UNESCO, 1973). Essa proposta integra aspectos fisionômicos, ecológicos e florísticos ao uso de sensoriamento remoto, para aprimorar a categorização das tipologias vegetativas e visa distinguir, com maior precisão, formações arbóreas e arbustivas, abertas e densas.

#### **4.2.1 Aquisição de Dados e Pré-Processamento**

A aquisição de dados para estimar a cobertura e altura do dossel da vegetação lenhosa da Caatinga envolveu a integração de múltiplas fontes orbitais, incluindo dados de sensoriamento remoto óptico (imagens multiespectrais), radar de abertura sintética (SAR) e dados LiDAR orbitais, além de informações topográficas derivadas de modelos digitais de elevação.

Os dados LiDAR foram obtidos da missão GEDI<sup>1</sup> (Global Ecosystem Dynamics Investigation) Release 2, com a utilização dos produtos L2A ("Elevation and Height Metrics"), que fornecem estimativas diretas da altura do dossel, e L2B ("Canopy Cover and Vertical

---

<sup>1</sup> A Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) da NASA é um instrumento LiDAR espacial a bordo da Estação Espacial Internacional que coleta dados desde abril de 2019. Ele mede a estrutura da vegetação com alta resolução, amostrando 4% da superfície terrestre durante sua missão de dois anos (Dubayah et al., 2020).

Profile Metrics"), que oferecem informações sobre a densidade da cobertura vegetal, ambos com resolução espacial de 25 metros.

Complementarmente, foram incorporados índices espectrais derivados das imagens ópticas do Sentinel-2, como o EVI (Enhanced Vegetation Index) e o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), úteis na avaliação da densidade e vigor da vegetação. Para enriquecer a caracterização estrutural do dossel, foram utilizados dados de radar do Sentinel-1 (SAR – Synthetic Aperture Radar), com resolução de 10 metros e polarizações VV e VH, capazes de diferenciar áreas de vegetação densa e aberta, mesmo sob cobertura de nuvens.

A influência do relevo na distribuição da vegetação foi avaliada por meio de variáveis topográficas extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão NASADEM, com resolução espacial de 30 metros, permitindo uma análise mais precisa das relações entre topografia e estrutura da vegetação.

Todo o pré-processamento e análise dos dados foi realizado na plataforma de computação em nuvem Google Earth Engine (GEE), que possibilitou a manipulação eficiente de grandes volumes de dados. Além disso, foi aplicada a máscara de cobertura florestal definida no Capítulo 3, assegurando que a modelagem se restringisse às áreas de vegetação lenhosa da Caatinga, excluindo formações não vegetadas ou que pudessem interferir na acurácia da classificação.

## **4.2.2 Método e Análise Dos Dados**

### **4.2.2.1 Modelagem da Estrutura da Vegetação**

Para caracterização estrutural da vegetação da caatinga, a altura e a cobertura do dossel foram estimadas a partir da integração de dados LiDAR do Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI), Produto GEDI L2A e L2B, com imagens ópticas e de radar, aplicando um modelo de regressão baseado no algoritmo Random Forest (RF). A abordagem foi implementada na plataforma Google Earth Engine (GEE), seguindo metodologias adaptadas de estudos recentes sobre modelagem da estrutura da vegetação (Kacic et al., 2021; Alvites et al., 2024; Wang et al., 2024).

### *Seleção e Pré-processamento dos Dados*

A modelagem da altura do dossel e da cobertura total do dossel foi baseada na integração de múltiplas fontes de dados, combinando informações LiDAR, ópticas, de radar e topográficas para aprimorar a precisão das estimativas dessas variáveis estruturais da vegetação. A principal fonte de dados foi o produto GEDI que disponibiliza medições diretas da estrutura da vegetação.

A altura do dossel (RH95) foi utilizada como métrica principal, representando o percentil 95 das alturas relativas registradas pelo GEDI. Esse indicador é amplamente reconhecido como uma estimativa robusta da altura máxima da vegetação. Já a cobertura do dossel (Total Canopy Cover - TCC) foi extraída do produto L2B e representa a projeção vertical da vegetação sobre o solo, fornecendo informações essenciais sobre a densidade da cobertura florestal.

Para garantir a qualidade dos dados do GEDI, foram aplicados filtros de qualidade, removendo medições com sinal danificado ou baixa sensibilidade, que poderiam comprometer a precisão das estimativas. Além disso, áreas com inclinação superior a 30% foram excluídas, seguindo a metodologia padrão de filtragem de dados LiDAR, a fim de minimizar distorções associadas à topografia acidentada.

Além do GEDI, foram incorporadas imagens ópticas do Sentinel-2 para o cálculo de índices espectrais amplamente utilizados na análise da vegetação, incluindo os índices NDVI e EVI. As imagens de radar do Sentinel-1 C-Band SAR, com polarizações VV e VH, foram adicionadas à análise para fornecer informações estruturais da vegetação, auxiliando na diferenciação entre áreas de alta e baixa densidade do dossel.

Por fim, foi utilizado o modelo de elevação digital NASADEM (30 m) para extrair variáveis topográficas, como elevação e declividade, considerando a influência desses fatores sobre a distribuição e o desenvolvimento da vegetação.

### *Construção da Base de Treinamento*

A construção da base de treinamento para modelar a densidade da cobertura e a altura do dossel, foi realizada por meio da integração de medições pontuais do GEDI (L2A e L2B) com os dados contínuos dos sensores Sentinel-1, Sentinel-2 e do Modelo Digital de Elevação (DEM). Como os dados do GEDI possuem resolução espacial de 25 metros e distribuição irregular, foi aplicada técnicas de agregação espacial, agrupando as medições em células de 100

× 100 metros. Possibilitando a extração de estatísticas descritivas das variáveis espectrais e topográficas e reduzindo possíveis erros de desalinhamento espacial.

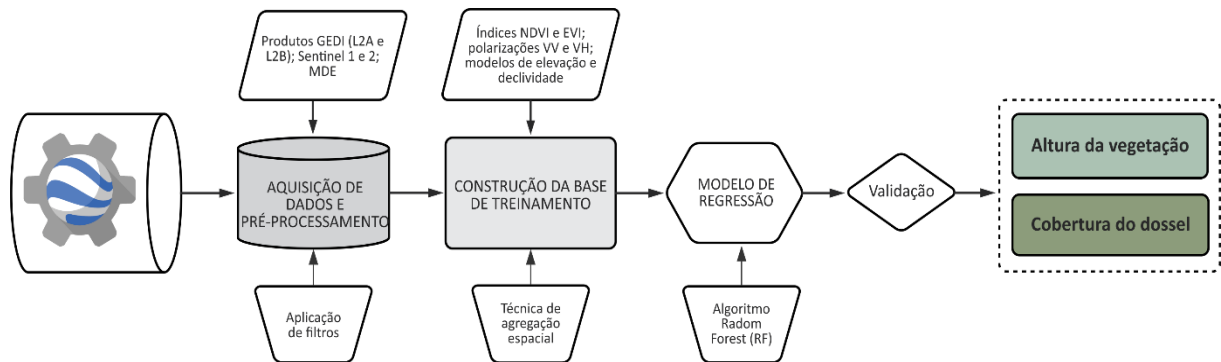
Para assegurar a compatibilidade entre os diferentes conjuntos de dados, as imagens raster foram reamostradas para uma grade de 10 metros utilizando interpolação bilinear, o que garantiu uma correspondência espacial mais precisa entre os dados de entrada. A amostragem foi conduzida de forma estratificada, de modo a representar adequadamente as diferentes classes de altura e cobertura do dossel, contemplando tanto áreas com vegetação densa quanto regiões com dossel mais esparsas.

A modelagem foi realizada por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, especificamente Random Forest (RF), um dos métodos mais robustos para modelagem não-paramétrica de variáveis ambientais. O modelo RF foi treinado para prever a altura do dossel (RH95) e a cobertura total do dossel com base em um conjunto de variáveis preditoras extraídas das imagens do Sentinel-1, Sentinel-2 e DEM. A abordagem do RF, baseada na média das previsões geradas por múltiplas árvores de decisão, proporcionou maior estabilidade e precisão preditiva.

A avaliação da acurácia preditiva do modelo de regressão foi realizada por meio de uma base de dados independente, com a aplicação de métricas estatísticas apropriadas para regressão, como o Erro Médio Quadrático (RMSE), Erro Absoluto Médio (MAE) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). Além disso, procedeu-se à remoção criteriosa de outliers com base na análise da distribuição dos resíduos da regressão, a fim de minimizar distorções estatísticas provocadas por valores atípicos e não representativos da variabilidade estrutural da vegetação da Caatinga. As informações completas sobre a validação do modelo, incluindo gráficos e análises quantitativas, estão apresentadas na **Avaliação B.1, apresentado no Apêndice B.**

Ao todo, cerca de 30.000 amostras GEDI, previamente filtradas por qualidade, foram empregadas na construção e validação do modelo, garantindo estimativas robustas e a geração de mapas contínuos e detalhados da altura e cobertura do dossel na área de estudo. A seguir é apresentado um fluxograma com a representação detalhada das etapas metodológicas.

Figura 21 - Fluxo de processamento e modelagem para estimativa da estrutura da vegetação



Fonte: O autor

### *Geração do Mapa e análise da estrutura da vegetação*

Após o treinamento, o modelo foi aplicado para estimar a altura e a cobertura do dossel em todos os pixels da região de estudo, resultando na produção de um mapa contínuo de altura e cobertura do dossel. Esse processo foi conduzido inteiramente no GEE, garantindo escalabilidade e eficiência computacional.

Para complementar a compreensão dos padrões estruturais gerados, foi realizada uma análise estatística descritiva das estimativas de altura e cobertura vegetal, abrangendo medidas como média, desvio padrão, valores máximos e mínimos. Essa análise encontra-se detalhada no **Apêndice C**, contribuindo para uma interpretação mais aprofundada da variação espacial da vegetação lenhosa na área de estudo.

#### 4.2.2.2 Método de Classificação tipológica da caatinga lenhosa

Com base nos resultados modelados e nas combinações de cobertura e altura do dossel, foi realizada a classificação tipológica da Caatinga lenhosa. Essa classificação segue as definições globais de vegetação propostas por organismos internacionais como a UNESCO, FAO (Food and Agriculture Organization) e UNEP (United Nations Environment Programme).

Segundo esses critérios, considera-se vegetação aberta aquela em que as copas são esparsas, mas ainda atingem uma cobertura mínima de 10%, enquanto a vegetação densa apresenta cobertura de copa igual ou superior a 40%, com copas interligadas formando um dossel contínuo. Em relação à estrutura vertical, a vegetação arbustiva é composta predominantemente por elementos lenhosos com altura entre 0,5 e 5 metros na maturidade, enquanto a vegetação arbórea é caracterizada pela dominância de árvores que ultrapassam 5



metros de altura na maturidade (UNESCO, 1973; UNEP/FAO, 1994; UNEP, 2001; FAO, 2005; UNEP/FAO/UNFF, 2009).

Para avaliar a correspondência da classificação inicial da vegetação, baseada na cobertura e na altura do dossel, com as condições observadas em campo, foram analisadas situações em que se identificou a presença de manchas arbóreas isoladas inseridas em uma matriz predominantemente arbustiva. Esses casos revelam a existência de formações vegetais mistas. Tais ocorrências, frequentemente associadas a fatores ambientais locais, como maior disponibilidade hídrica ou áreas em regeneração, indicam que a estrutura paisagem na Caatinga é mais heterogênea do que as tipologias idealizadas inicialmente sugerem.

Para implementar uma solução cartográfica para essa realidade, o procedimento adotado se baseou em três fases principais: 1) identificação do inicial do grau de cobertura (%) e altura máxima do dossel (em metros); 2) detecção de fragmentos arbóreos dentro de matrizes arbustivas e; 3) definição da tipologia final da vegetação.

#### *Classificação Inicial de Cobertura e Altura*

Na primeira etapa, a cobertura vegetal e a altura vegetal são classificadas em categorias específicas. A função  $f_c(C)$  classifica a cobertura vegetal como 'caatinga aberta' para valores entre 10 e 40%, e 'caatinga densa' para valores acima de 40% de cobertura. A função  $f_a(A)$  classifica a altura vegetal como 'caatinga arbustiva' para alturas até 5 metros, e 'caatinga arbórea' para alturas maiores que 5 metros.

$$f_a(A) = \begin{cases} \alpha & \text{se } 0 < A \leq 5 \text{ (caatinga arbustiva)} \\ \gamma & \text{se } A > 5 \text{ (caatinga arbórea)} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_c(C) = \begin{cases} \alpha & \text{se } 10 < C \leq 40 \text{ (caatinga aberta)} \\ \beta & \text{se } C > 40 \text{ (caatinga densa)} \end{cases} \quad (7)$$

Onde,  $C$  representa a cobertura vegetal, medida em porcentagem e  $A$  indica a altura vegetal, medida em metros.

### *Combinando Cobertura e Altura para Tipologia Inicial*

Posteriormente, uma tipologia inicial é determinada combinando as classificações de cobertura e altura. A função  $ft(T)$  combina os valores de cobertura e altura para formar tipos específicos de caatinga:

$$ft(T) = \begin{cases} x\alpha & \text{se } A = x \text{ e } C = \alpha \text{ (caatinga arbustiva aberta)} \\ x\beta & \text{se } A = x \text{ e } C = \beta \text{ (caatinga arbustiva densa)} \\ \gamma\alpha & \text{se } A = \gamma \text{ e } C = \alpha \text{ (caatinga arbórea aberta)} \\ \gamma\beta & \text{se } A = \gamma \text{ e } C = \beta \text{ (caatinga arbórea densa)} \end{cases} \quad (8)$$

### *Detecção e Análise de manchas Arbóreas contidas em matrizes Arbustivas*

A terceira fase foca na detecção de pequenas manchas de vegetação arbórea dentro das áreas arbustivas. A função  $fpm(PM)$ , que identifica as áreas onde a proporção de vegetação arbórea é menor que o valor da área de dois píxeis somados.

$$fpm(PM) = \{M \setminus A(\gamma) < 2 \cdot \rho\} \quad (9)$$

Onde,  $PM$  representa pequenas manchas;  $M$  refere-se a todas as manchas de vegetação arbórea detectadas na área de estudo;  $\rho$  é o valor da área de um pixel da imagem, usado como unidade de medida para determinar a extensão das manchas arbóreas.

A função  $fdm(DM)$  estimar a distância média do raio de influência das pequenas manchas arbóreas considerando a dispersão biológica a partir de sua borda. Para determinar uma média padrão para a distância de dispersão das espécies arbóreas em vegetação semiárida e tropical, consideramos dados de diversos estudos que analisam diferentes espécies e métodos de dispersão. Os resultados dessas pesquisas mostram que a distância média de dispersão para muitas espécies de árvores é em torno de 30-40 metros até a planta-mãe (Hubbel, 1979; Augspurger, 1984; Sinha, Davidar, 1992; Guariguata, Pinard, 1998; Bakke et al, 2020). Estas distâncias médias incluem tanto dispersões anemocóricas quanto zoocóricas e é consistente em diversos contextos ecológicos e geográficos.

Desta forma, para fins de padronização, foi proposto a média de 30 metros como valor padrão de dispersão da vegetação arbórea da caatinga, cujo valor fornece um indicador útil para

a compreensão dos padrões de dispersão e seus impactos na dinâmica e estrutura da vegetação (Sinha, Davidar, 1992; Guariguata, Pinard, 1998). Com isso, o valor foi incorporado junto a  $f_{dm}(DM)$  para estimar a distância:

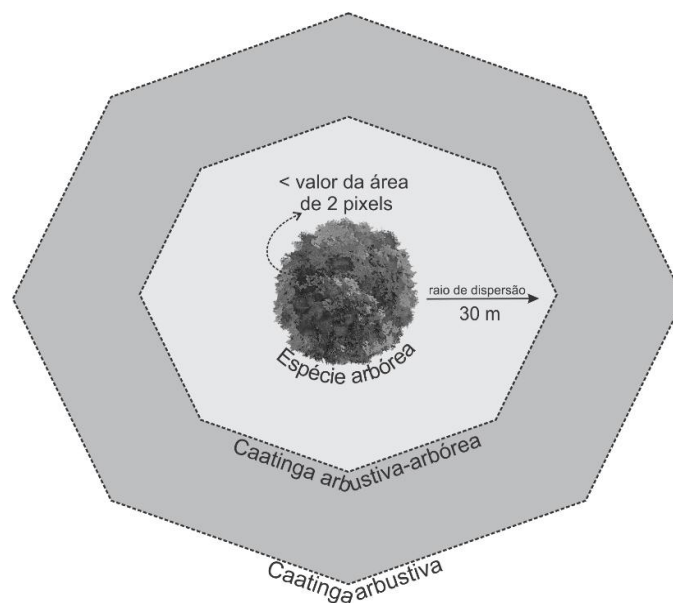
$$f_{dm}(DM) = FocalMean(PM, 30) + A(x) \quad (10)$$

Por fim, a função  $f_{aa}(AA)$  agrega esses dados das funções anteriores para classificar a área como 'caatinga arbustiva-arbórea'. Esta função simplesmente soma as funções de detecção de manchas e distância média:

$$f_{aa}(AA) = DM + PM \quad (11)$$

O diagrama a seguir (**Figura 22**), ilustra o método utilizado para identificar e classificar áreas de vegetação arbórea em meio a zonas predominantemente arbustivas. O procedimento se baseia na análise de uma distância radial de 30 metros, que foi a média definida a partir dispersão biológica, a partir de uma ou mais espécies arbóreas que, juntas, ocupam uma área inferior a 2 pixels. Essa configuração é observada em um contexto de caatinga arbustiva, visando a determinação de uma nova tipologia vegetacional, denominada caatinga arbustiva-arbórea.

Figura 22 - processo para classificação da caatinga arbustiva-arbórea



Fonte: O autor

### Definição da Tipologia Final

A fase final, por meio da  $f_t(TF)$  reclassifica a vegetação com a inclusão da nova categoria 'caatinga arbustiva-arbórea' para cada tipo de cobertura ( $C$ ), formando seis classes finais: caatinga arbustiva aberta; caatinga arbustiva densa; caatinga arbórea aberta; caatinga arbórea densa; caatinga arbustiva-arbórea aberta e caatinga arbustiva-arbórea densa.

$$f_{tf}(TF) \begin{cases} x\alpha & \text{para } A = x, C = \alpha \text{ (caatinga arbustiva aberta)} \\ x\beta & \text{para } A = x, C = \beta \text{ (caatinga arbustiva densa)} \\ \gamma\alpha & \text{para } A = \gamma, C = \alpha, \text{ (caatinga arbórea aberta)} \\ \gamma\beta & \text{para } A = \gamma, C = \beta \text{ (caatinga arbórea densa)} \\ x\gamma\alpha & \text{para } A = AA, C = \alpha \text{ (caatinga arbustiva – arbórea aberta)} \\ x\gamma\beta & \text{para } A = AA, C = \beta \text{ (caatinga arbustiva – arbórea densa)} \end{cases} \quad (12)$$

Esse procedimento metodológico permite uma classificação detalhada e adaptada às particularidades da vegetação Caatinga, levando em conta tanto a densidade da cobertura vegetal quanto a altura das plantas, além de identificar interações específicas entre as formações arbustivas e arbóreas.

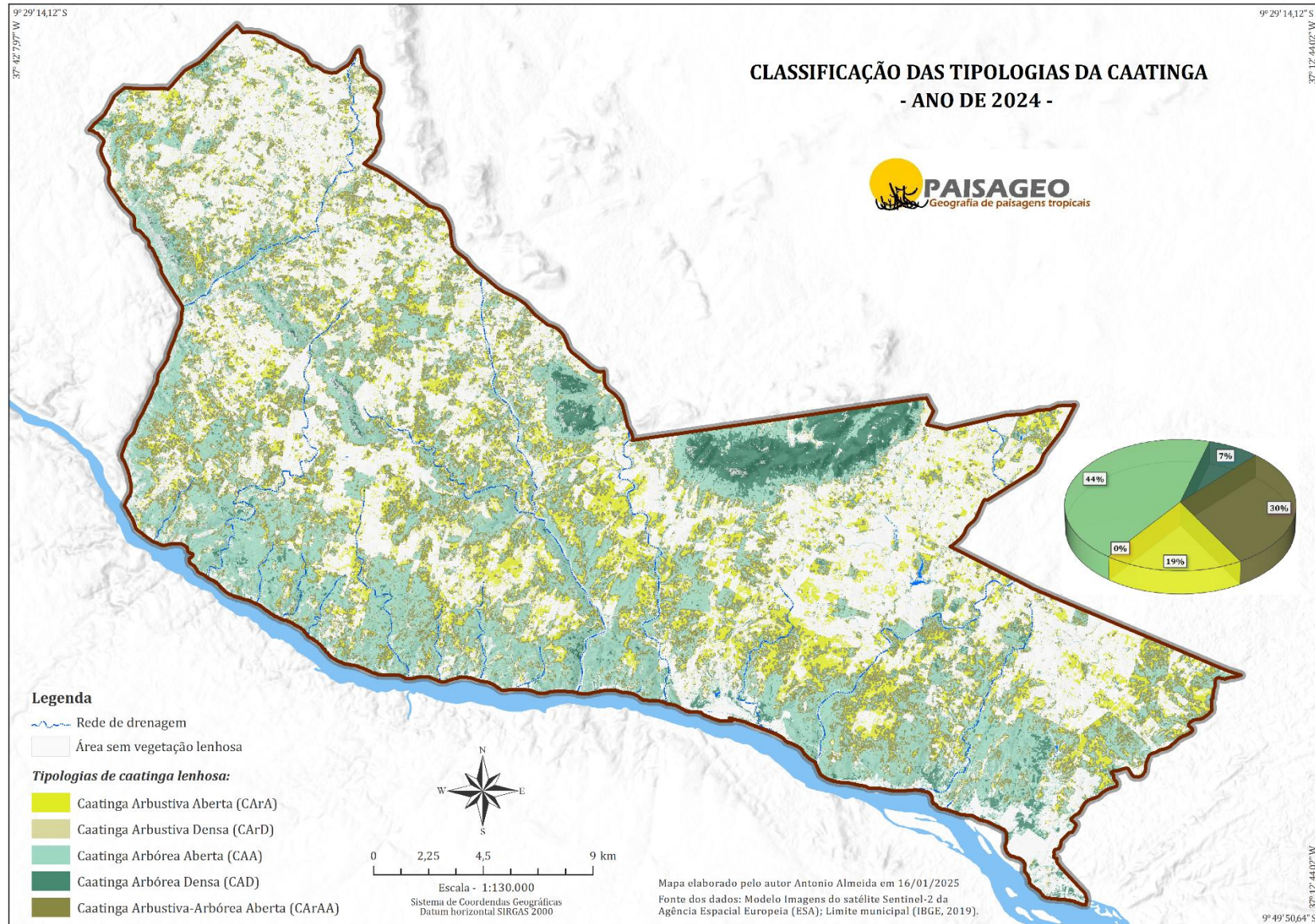
Como desdobramento aplicado desta etapa, foi desenvolvida uma plataforma interativa no ambiente Google Earth Engine (GEE), voltada à classificação automatizada das tipologias da Caatinga, com base em aprendizado de máquina e variáveis estruturais. Essa ferramenta está descrita no **Aplicativo D.1, presente no Apêndice D** e permite reproduzir a metodologia apresentada neste capítulo, com potencial de aplicação em diferentes contextos semiáridos.

### 4.3 CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS TIPOLOGIAS DA VEGETAÇÃO LENHOSA DA CAATINGA

A aplicação de uma metodologia integrada para o mapeamento da Caatinga revelou uma complexa diversidade vegetativa muito influenciada por fatores sazonais e ambientais. A análise permitiu identificar seis fitofisionomias dentro do bioma: Caatinga Arbustiva Aberta (ArA), Caatinga Arbustiva Densa (ArD), Caatinga Arbórea Aberta (AA), Caatinga Arbórea Densa (AD), Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta (ArAA) e Caatinga Arbustiva-Arbórea Densa (ArAD). Essas categorias refletem de fato a heterogeneidade do bioma e demonstram a eficácia da metodologia na identificação e mapeamento das variações estruturais da vegetação.

Para ilustrar essas categorizações, foi elaborado um mapa de tipologias vegetais referente ao ano de 2024 (**Figura 23**), complementado por uma tabela que apresenta as áreas ocupadas por cada tipologia e suas respectivas porcentagens em relação à área total (**Tabela 7**). Essas ferramentas são essenciais para visualizar as variações fisionômicas e a distribuição das tipologias identificadas, fornecendo uma perspectiva clara e detalhada da estrutura vegetal da Caatinga

Figura 23 - Mapa da classificação das tipologias de caatinga lenhosa da área de estudo.



Fonte: O autor

Tabela 7 - Áreas das tipologias da caatinga lenhosa do ano de 2024

Tipologia	Área km <sup>2</sup>	%
Caatinga arbustiva aberta (ArA)	71,15	18,51
Caatinga arbustiva densa CARd)	0,001	0,000
Caatinga arbórea aberta (AA)	169,48	44,10
Caatinga arbórea densa (AD)	28,82	7,50
Caatinga arbustiva-arbórea aberta (ArAA)	114,88	29,89
<b>Total</b>	<b>384,33</b>	<b>100,00</b>

Fonte: O autor

Para validar a metodologia, conseqüentemente as categorizações, foram realizadas análises em 13 parcelas amostrais (**Quadro 4**), cada uma com raio de 20 metros, permitindo a observação detalhada da composição florística, identificação das espécies e registro das alturas das plantas. A coleta de dados foi inteirada com registros fotográficos, garantindo uma documentação visual que reflete as características específicas de cada tipologia estudada.

Quadro 4 - Síntese das informações levantadas em capo das parcelas amostrais.

PA	Coordenadas Geográficas Centrais	Caatinga	Espécies Registradas	Abundância	Altura
1	-37,43743; -9,72260	AD	5 CaraibeiraS ( <i>Tabebuia aurea</i> ), 3 BraúnaS ( <i>Schinopsis brasiliensis</i> ), 1 Tingui ( <i>Magonia pubescens</i> ), 1 Pereiro ( <i>Aspidosperma pyriformium</i> ) e 1 Quixabeira ( <i>Sideroxylon obtusifolium</i> ).	11	Altura máxima (11m); mínima (7m); majoritária (10m)
2	-37,43983; -9,70925	AA	5 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ), 1 Braúna ( <i>Schinopsis brasiliensis</i> ), 2 Angicos ( <i>Anadenanthera colubrina</i> ), 2 Mororós ( <i>Bauhinia cheilantha</i> ), 2 Imburanas ( <i>Commiphora leptophloeos</i> ), 1 indivíduo de Pereiro ( <i>Aspidosperma pyriformium</i> ) e 1 de Aroeira ( <i>Astronium urundeuva</i> ).	14	Altura máxima (10m); mínima (6m); majoritária (8m)
3	-37,43985; -9,70300	AA	5 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ), 3 Imburanas ( <i>Commiphora leptophloeos</i> ), 3 Angicos ( <i>Anadenanthera colubrina</i> ), 1 Aroeira ( <i>Astronium urundeuva</i> ), 1 Braúna ( <i>Schinopsis brasiliensis</i> ) e 1 Pereiro ( <i>Aspidosperma pyriformium</i> ).	13	Altura máxima (9m); mínima (7m); majoritária (8m)

4	-37,43097; -9,64778	AD	2 Cajaranas ( <i>Spondias mombin</i> ), 2 Arapiracas ( <i>Chloroleucon dumosum</i> ), 1 Angico ( <i>Anadenanthera colubrina</i> ), 2 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ), 1 indivíduo de Quixabeira ( <i>Sideroxylon obtusifolium</i> ), 1 Barriguda ( <i>Ceiba glaziovii</i> ) e 1 Pau-Piranha ( <i>Pseudobombax marginatum</i> ).	10	Altura máxima (12m); mínima (7m); majoritária (9m)
5	-37,40948; -9,64137	ArAA	4 de Juremas-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> ), 6 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ), 2 Juazeiros ( <i>Sarcomphalus joazeiro</i> ) e 1 Marmeleiro ( <i>Croton sonderianus</i> ).	13	Altura máxima (6m); mínima (2m); majoritária (2,5m)
6	-37,48222; -9,65383	ArA	10 indivíduos de Jurema-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> ) e 1 de Caraibeira ( <i>Tabebuia aurea</i> ).	11	Altura máxima (3m); mínima (1,5m); majoritária (2m)
7	-37,50840; -9,66061	ArA	12 indivíduos de Jurema-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> )	12	Altura máxima (2m); mínima (1m); majoritária (1,5m)
8	-37,53030; -9,65117	ArA	8 indivíduos de Jurema-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> ) e 6 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ).	14	Altura máxima (3m); mínima (1,5m); majoritária (2m)
9	-37,56079; -9,64854	AA	4 Mororós ( <i>Bauhinia cheilantha</i> ), 2 Angicos ( <i>Anadenanthera colubrina</i> ), 2 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ), 2 Juremas-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> ), a 1 indivíduo de Juazeiro ( <i>Sarcomphalus joazeiro</i> ), 1 Arapiraca ( <i>Chloroleucon dumosum</i> ), 1 Pau-ferro ( <i>Libidibia ferrea</i> ) e 1 Pau-piranha ( <i>Pseudobombax marginatum</i> ).	14	Altura máxima (7m); mínima (5m); majoritária (6m)
11	-37,56215; -9,67355	ArAA	6 Juremas-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> ), 5 Espinheiros ( <i>Senegalia polyphylla</i> ), 3 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ) e 3 Mororós ( <i>Bauhinia cheilantha</i> ).	17	Altura máxima (5,5m); mínima (2m); majoritária (3m)
12	-37,55881; -9,69039	ArA	18 Indivíduos de Jurema-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> )	18	Altura máxima (3m); mínima (1,5m); majoritária (2m)

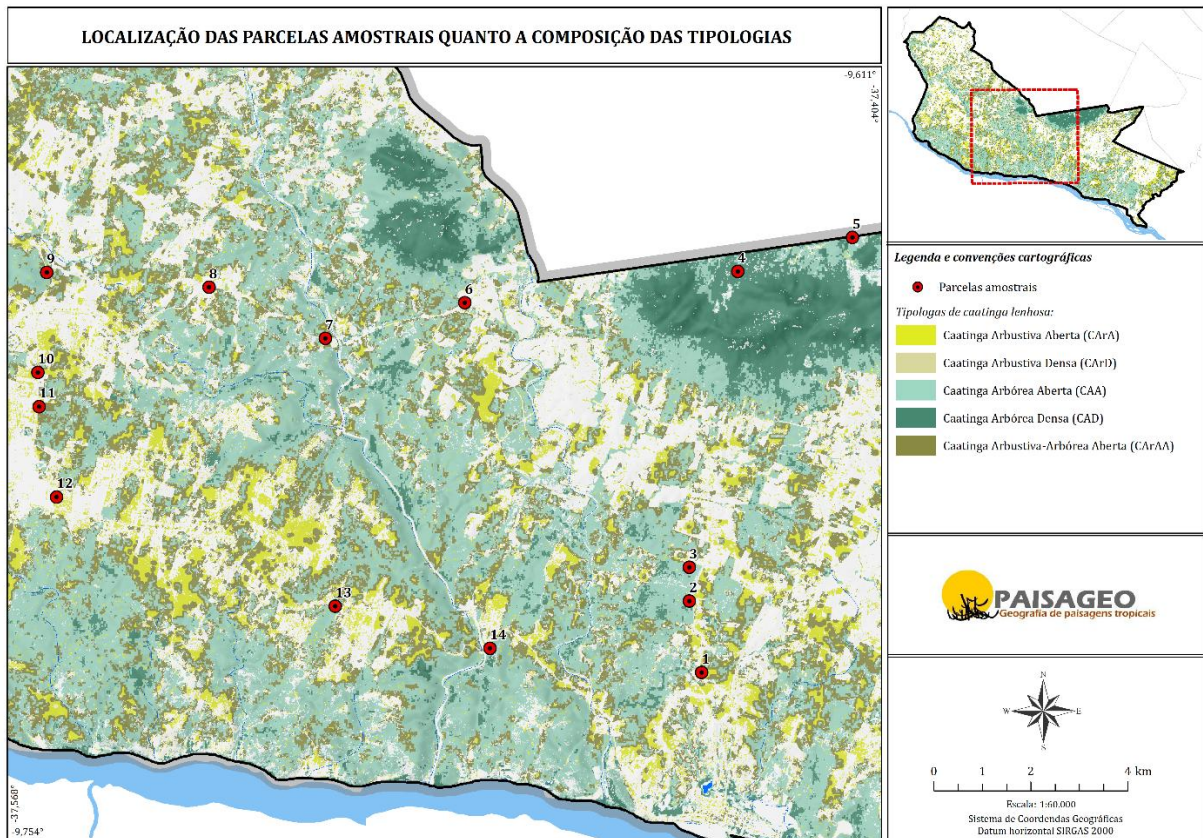


13	-37,50631; -9,71054	CAA	3 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ), 4 Angicos ( <i>Anadenanthera colubrina</i> ), 2 Pereiros ( <i>Aspidosperma pyrifolium</i> ), além de 1 indivíduo de Aroeira ( <i>Astronium urundeuva</i> ), 1 Braúna ( <i>Schinopsis brasiliensis</i> ) e 1 Jurema-preta ( <i>Mimosa tenuiflora</i> ).	12	Altura máxima (8,5m); mínima (6m); majoritária (7m)
14	-37,47721; -9,71825	CAA	6 Catingueiras ( <i>Cenostigma pyramidale</i> ), 3 Juazeiro ( <i>Sarcomphalus joazeiro</i> ), 1 Quixabeira ( <i>Sideroxylon obtusifolium</i> ) e 1 Espinheiro ( <i>Senegalia polyphylla</i> ).	11	Altura máxima (7m); mínima (5,5m); majoritária (6m)

Legenda: PA – Parcela Amostral. Fonte: O autor

A localização e distribuição espacial parcelas amostrais podem ser vistas na **Figura 24**, mostrando a posição de cada parcela no contexto da área de estudo. Essa combinação entre quadro e mapa exibe uma visão global dos registros realizados em campo, confirmando a representatividade das parcelas e auxiliando na compreensão da diversidade e estrutura dos diferentes tipos de vegetação considerados.

Figura 24 - Localização das parcelas amostrais



Fonte: O autor

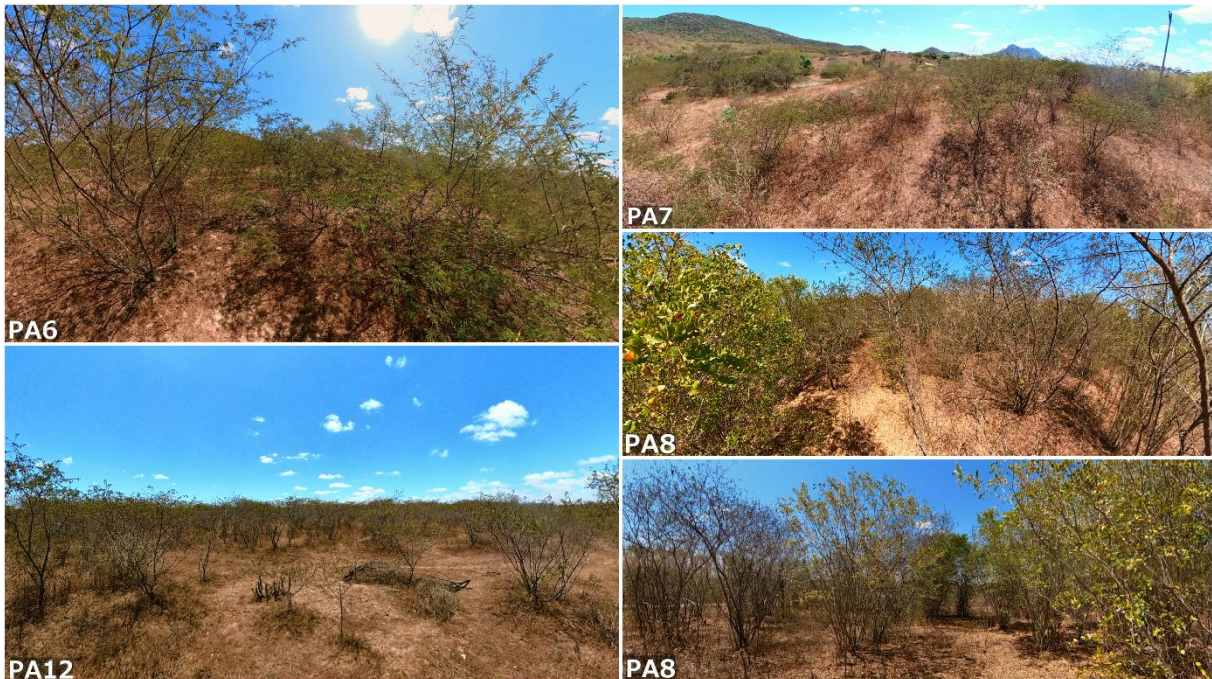
Com base nessas descrições é possível detalhar os seguintes aspectos para cada tipologia:

### Caatinga Arbustiva Aberta (ArA)

A CArA constitui a terceira maior extensão de vegetação de Caatinga na área de estudo, cobrindo cerca de 65,74 km<sup>2</sup> ou 16,75% de toda a área. A altura da vegetação nessa tipologia varia entre 2,5 m e 4,5 m, com um valor médio de 4,2 m, caracterizada por um dossel irregular e uma vegetação bastante baixa e esparsa. Essa configuração pode refletir adaptações às condições semiáridas da região ou pode ser uma resposta a perturbações ambientais.

Essa tipologia é marcada por um ambiente aberto, onde predominam espécies adaptadas ao clima semiárido e locais perturbados. Entre as arbustivas mais comuns estão Fabaceae como *Bauhinia cheilantha* (mororó), *Cenostigma pyramidale* (catingueira) e *Mimosa tenuiflora* (jurema-preta), além de Euphorbiaceae, *Jatropha mollissima* (pinhão-bravo). Tanto a Catingueira quanto a Jurema preta, apesar de seu porte arbustivo, são frequentemente classificadas como arbóreas, adicionando diversidade à paisagem.

Figura 25 - Registros da Caatinga Arbustiva Aberta na área de estudo, evidenciando sua vegetação esparsa e baixa, composta por uma diversidade de espécies herbáceas, arbustivas e suculentas adaptadas às condições locais.



Fonte: O autor

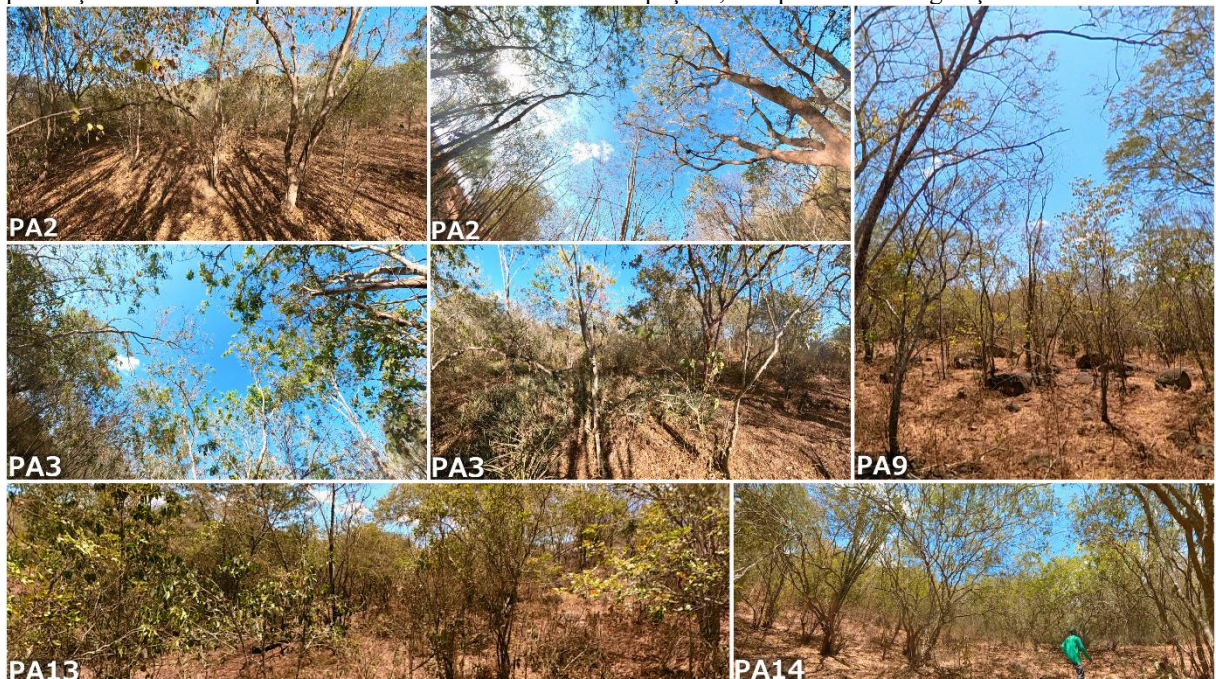
Em áreas com afloramentos rochosos e solos pedregosos, as cactáceas dos gêneros *Pilosocereus*, *Xiquexique* e *Tacinga* se destacam, assim como bromeliáceas dos gêneros *Encholirium* e *Neoglaziovia*. Essas espécies são características de ambientes extremos e contribuem para a composição peculiar da vegetação da Caatinga Arbustiva Aberta.

A cobertura herbácea anual é variável, podendo estar significativamente degradada ou até ausente em áreas fortemente impactadas pela pecuária. Essa tipologia reflete não apenas as condições ambientais da região, mas também os impactos antrópicos que moldam sua estrutura e composição.

### Caatinga Arbórea Aberta (CAA)

A CAA é a tipologia mais expressiva da área de estudo, ocupando 184,26 km<sup>2</sup>, o que representa 46,95% da cobertura vegetal total. Essa fisionomia é caracterizada pela presença de indivíduos arbóreos de porte médio, relativamente espaçados, formando um estrato uniforme, mas com variações locais que refletem as condições ambientais e as intervenções antrópicas.

Figura 26 - Registros das características típicas da Caatinga Arbórea Aberta na área de estudo, evidenciando a presença de árvores de porte médio distribuídas de forma espaçada, compondo uma vegetação diversificada.



Fonte: O autor

Em relação ao relevo, a presente tipologia ocorre principalmente em áreas de relevo suavemente ondulado, com declividade média de 15,48%. A altura da vegetação varia de 5,1 m

a 21,3 m, com altura média de 6,3 m, o que igualmente sugere uma cobertura heterogênea que é sensível a distúrbios de clima e solo e às condições de manejo. Em algumas áreas, o desenvolvimento de árvores altas é favorecido por desenvolvimento distinto, enquanto em outras a vegetação é relativo de baixo crescimento em resposta à exploração anterior ou a uma limitação de recursos.

A CAA abriga uma rica diversidade de espécies, incluindo árvores de médio porte e uma variedade de espécies herbáceas. Entre as principais espécies arbóreas destacam-se Fabaceae com *Cenostigma pyramidale* (catingueira), *Bauhinia cheilantha* (mororó), *Mimosa verrucosa* (jurema-branca), *Erythrina velutina* (mulungu) e *Anadenanthera colubrina* (angico). Além delas, o pereiro (*Aspidosperma pyriforme*, Apocynaceae), a baraúna (*Schinopsis brasiliensis*, Anacardiaceae), a quixabeira (*Sideroxylon obtusifolium*, Sapotaceae), a imburana-de-cambão (*Commiphora leptophloeos*, Burseraceae), e aroeira (*Astronium urundeuva*, Anacardiaceae).

Figura 27 - Panorama de parte da Caatinga Arbórea Aberta presente da área de estudo



### Caatinga Arbórea Densa (CAD)

A CAD é uma tipologia caracterizada por árvores altas e densamente agrupadas, formando um estrato uniforme e contínuo. Esta formação ocupa uma área de 29,64 km<sup>2</sup>, o que representa 7,55% da cobertura vegetal lenhosa na área de estudo, sendo a segunda menor extensão entre as fisionomias analisadas. Predominantemente encontrada em regiões de relevo ondulado a fortemente ondulado, a CAD apresenta uma declividade média de 29%, o que a torna menos acessível e, conseqüentemente, menos impactada por atividades humanas.

A vegetação dessa tipologia é caracterizada por alturas superiores, variando de 5,5 m a 29,5 m, com uma média impressionante de 10,7 m. A altura das árvores é relacionada a condições de solo e clima favoráveis, associadas a menos interferência antrópica, permitindo dessa forma, um desenvolvimento vegetativo mais denso.

Figura 28 - Registros das características típicas da Caatinga Arbórea Densa na área de estudo, evidenciando a presença de árvores altas e uma cobertura densa que representa uma das formações mais imponentes da Caatinga Lenhosa.



Fonte: O autor

A composição florística é dominada por espécies arbóreas de grande porte, como angico (*Anadenanthera colubrina*, Fabaceae), aroeira (*Astronium urundeuva*, Anacardiaceae), cedro-verdadeiro (*Cedrela fissilis*, Meliaceae), barriguda (*Ceiba glaziovii*, Malvaceae), arapiraca (*Chloroleucon dumosum*, Fabaceae), trapiá (*Crateva tapia*, Capparaceae), caraibeira (*Tabebuia*

*aurea*, Bignoniaceae), pau-d'arco-roxo (*Handroanthus impetiginosus*, Bignoniaceae), pau-d'arco-amarelo (*Handroanthus serratifolius*, Bignoniaceae), bom-nome (*Monteverdia rigida*, Celastraceae), jurema-branca (*Mimosa verrucosa*, Fabaceae) e baraúna (*Schinopsis brasiliensis*, Anacardiaceae).

Figura 29 - Panorama de parte da Caatinga Arbórea Densa presente da área de estudo



### Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta (CArAA)

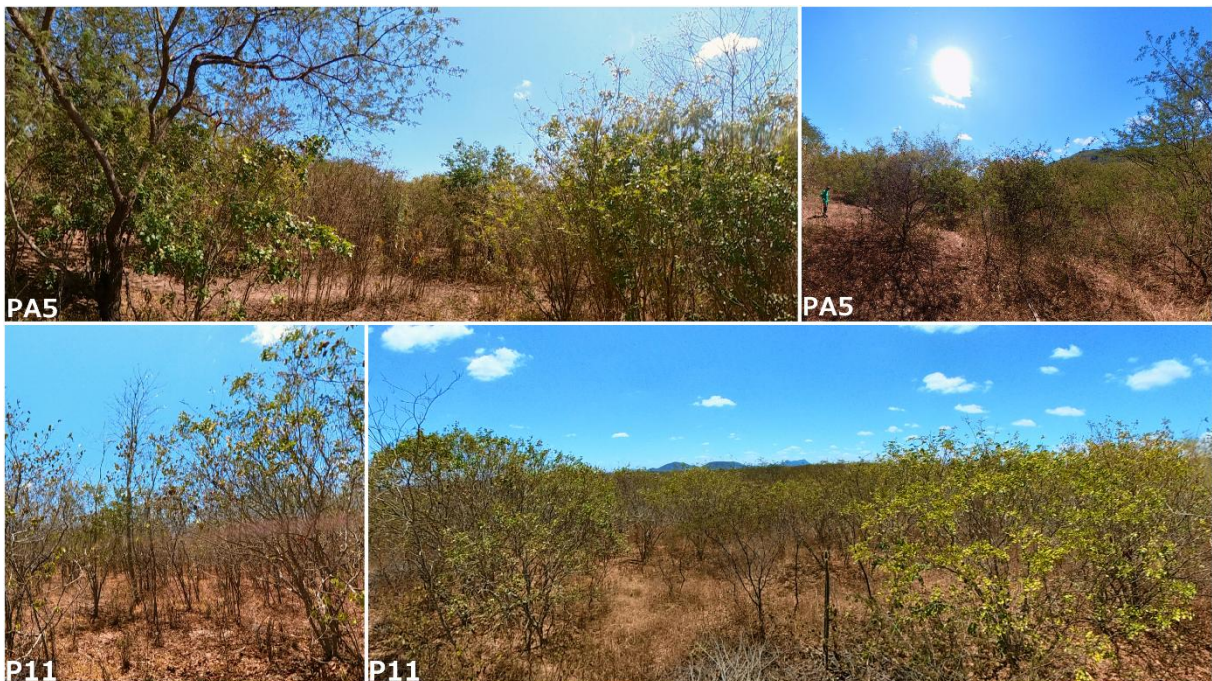
A CArAA cobre uma área de 112,82 km<sup>2</sup>, correspondendo a 28,75% da cobertura vegetal total, sendo a segunda maior extensão entre as fisionomias estudadas. Essa tipologia é caracterizada por uma altura variável entre 2,9 m e 16,3 m, com uma média de 4,7 m, refletindo uma combinação de características arbustivas e arbóreas. Essa heterogeneidade é resultado de uma interação complexa entre práticas de manejo da terra, condições ambientais locais e dinâmicas de sucessão ecológica.

A composição florística dessa tipologia abrange uma diversidade de espécies que convivem em diferentes estratos vegetativos. Entre as espécies arbustivas mais comuns se destacam pinhão-bravo (*Jatropha mollissima*, Euphorbiaceae), unha-de-gato (*Senegalia tenuifolia*, Fabaceae) e espinheiro (*Senegalia polyphylla*, Fabaceae). Além de árvores de menor porte, como as Fabaceae jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), catingueira (*Cenostigma*

*pyramidale*) e mororó (*Bauhinia cheilantha*). Além disso, estão presentes árvores de maior porte: pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*, Apocynaceae), faveleiro (*Cnidoscolus quercifolius*, Euphorbiaceae), imburana-de-cambão (*Commiphora leptophloeos*, Burseraceae), juazeiro (*Sarcomphalus joazeiro*, Rhamnaceae), umbuzeiro (*Spondias tuberosa*, Anacardiaceae) e quixabeira (*Sideroxylon obtusifolium*, Sapotaceae). Essa composição cria um mosaico vegetativo único, refletindo a adaptabilidade das espécies às variações ambientais.

Adicionalmente, essa tipologia inclui cactáceas de pequeno porte e um estrato herbáceo anual que varia em densidade e composição de acordo com as condições de precipitação, características do solo e a penetração de luz solar. Essas condições favorecem o crescimento de espécies heliófilas no extrato herbáceo, contribuindo ainda mais para a diversidade adaptativa desta formação.

Figura 30 - Registros das características típicas da Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta na área de estudo, destacando a combinação de arbustos e árvores de diferentes portes e a ampla diversidade adaptativa que define essa tipologia



Fonte: O autor

A Tipologia Caatinga Arbustiva-Arbórea Densa (CArAD) não é identificada na área de estudo, o que pode ser definida pela ausência de condições detalhadas para coesão entre árvores densamente agrupadas dentro de uma área de arbustos densos. A alta densidade de estratos arbustivos, além de competir por recursos como luz, nutrientes e espaço físico, cria um ambiente desfavorável para o estabelecimento e pleno crescimento de árvores maiores.

A análise da Caatinga Arbustiva Densa (CArD), que apresentou uma área extremamente reduzida de apenas 0,001 km<sup>2</sup>, demonstrou as dificuldades práticas de identificação e delimitação de tipologias com distribuição tão limitada. A área mínima da CArD, associada à dificuldade de representá-la de forma consistente em campo e em análises espaciais, reforça os desafios de incluir tipologias com extensões tão pequenas em uma avaliação ampla e representativa.

Por esses motivos, a tipologia CArD não será avaliada nesta pesquisa, visto que sua representatividade reduzida compromete a análise estatística e espacial, dificultando a obtenção de conclusões significativas sobre sua dinâmica ecológica. Tal decisão também permite a concentração de recursos nos tipos mais amplamente distribuídos e relevantes para a compreensão da dinâmica da vegetação da Caatinga, garantindo assim uma análise robusta e representativa das condições da área de estudo.

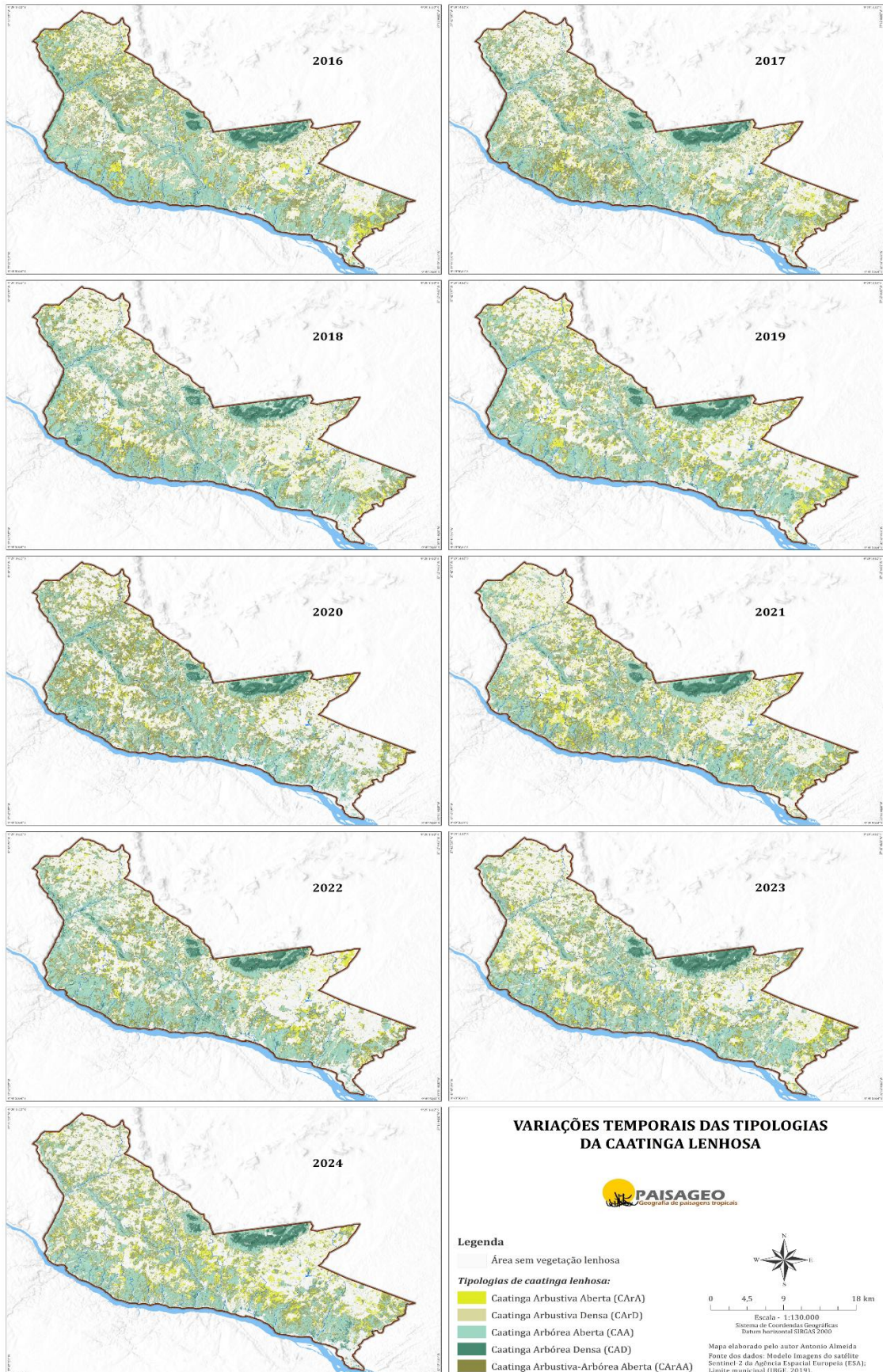
#### 4.4 AVALIAÇÃO DINÂMICAS DAS TIPOLOGIAS

A análise dos processos dinâmicos da vegetação é de importância primordial para identificar padrões de mudanças florísticas e estruturais; e fornecem subsídios imprescindíveis para monitoramento ambiental e avaliação de impacto, bem como formulação de estratégias de conservação e restauração ambiental (Clements, 1936; Martins, 1989; Gandolfi et al., 1995; Martins e Rodrigues, 1999). Esse entendimento, torna-se especialmente relevante para a Caatinga Lenhosa, considerando a importância desse bioma para a manutenção da biodiversidade e o equilíbrio dos sistemas ecológicos em regiões semiáridas.

A **figura 31** a seguir ilustra a evolução espacial das tipologias vegetais da Caatinga Lenhosa no período de 2016 a 2024, mostrando transições entre diferentes formações. Essas representações permitem identificar mudanças estruturais e florísticas ao longo dos anos, assim, mostrar a dinâmica ecológica e as respostas da vegetação a diferentes fatores de influência.



Figura 31 - Mapas da classificação tipológica dos anos de 2016 a 2024.



Fonte: O autor

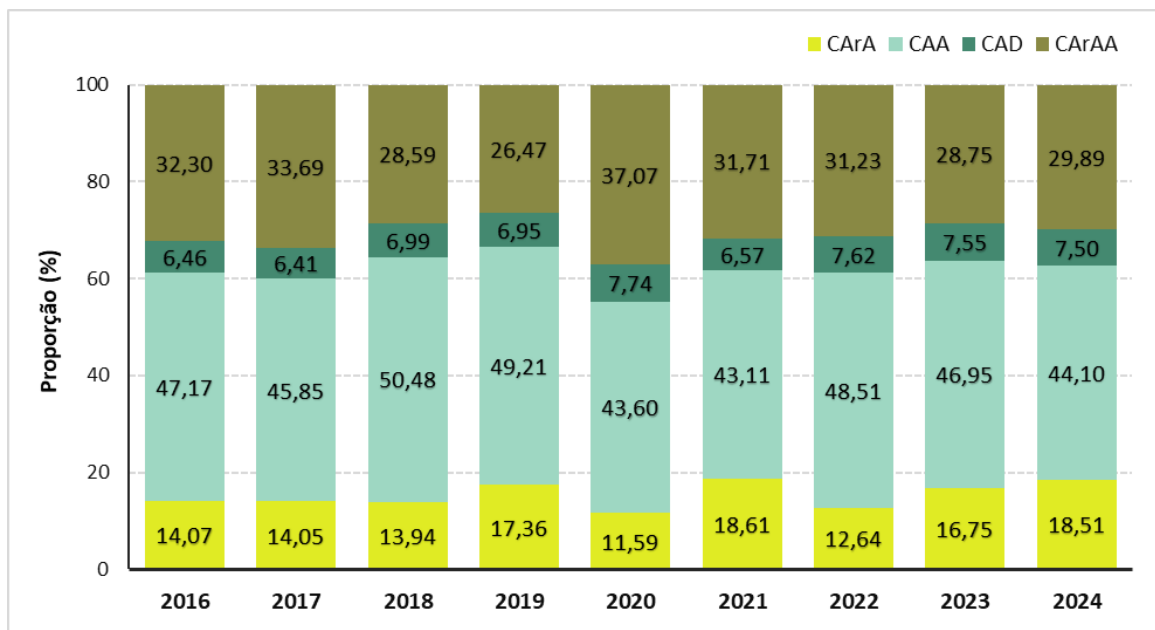
A apresentação desses mapas visa não apenas ilustrar as dinâmicas espaciais das tipologias ao longo do tempo, mas também fornecer um panorama detalhado de informações que pode orientar estratégias para a preservação da caatinga. A análise conjunta da **Tabela 8** e do gráfico de proporção (**Figura 32**) permitem compreender a dinâmica das tipologias da Caatinga Lenhosa no período. Essas representações quantitativas e percentuais destacam as oscilações na área ocupada por cada tipologia (em km<sup>2</sup>) e sua participação relativa ao longo do tempo, evidenciando os processos dinâmicos.

Tabela 8 - Áreas das classes tipológicas da caatinga lenhosa no período de 2016-2024.

Ano	Tipologias (km <sup>2</sup> )			
	CArA	CAA	CAD	CArAA
2016	61,56	206,42	28,28	141,36
2017	57,09	186,24	26,02	136,85
2018	54,96	199,04	27,56	112,74
2019	71,88	203,72	28,78	109,57
2020	47,41	178,37	31,65	151,64
2021	75,39	174,69	26,62	128,48
2022	50,08	192,23	30,19	123,75
2023	65,74	184,26	29,64	112,82
2024	71,15	169,48	28,82	114,88

Fonte: O autor

Figura 32 - Proporção das áreas (km<sup>2</sup>) das tipologias da caatinga lenhosa



Fonte: O autor

Com base na combinação dessas informações, conseguimos identificar tendências específicas da transformação da paisagem, como expansão ou retração de determinadas tipologias, e desafios para a conservação e o manejo sustentável da vegetação lenhosa da Caatinga.

A CArA apresenta variações significativas ao longo do período analisado, com um aumento expressivo em 2019 (71,88 km<sup>2</sup>), seguido por uma redução em 2020 (47,41 km<sup>2</sup>). Essa flutuação reflete possíveis eventos de regeneração temporária, seguidos de novas perturbações, posicionando a CArA como um indicador-chave de distúrbios ambientais. A proporção relativa dessa tipologia acompanha essas oscilações, evidenciando sua alta sensibilidade às alterações ambientais e antrópicas.

Essa tipologia é caracterizada pela predominância de espécies pioneiras lenhosas, como *Mimosa tenuiflora* (jurema-preta), *Croton sonderianus* (marmeleiro) e *Cenostigma pyramidale* (catingueira). Essas espécies são frequentemente encontradas em áreas de sucessão secundária, tornando-se importantes bioindicadores de condições ecológicas e processos de recuperação.

A presença de *Mimosa tenuiflora* na CArA, por exemplo, sugere que muitas dessas áreas podem estar passando por um processo inicial de regeneração, caracterizado por indivíduos de baixa estatura (**Figura 33**). Essa espécie é amplamente reconhecida por sua capacidade de prosperar em condições adversas, refletindo a resiliência da vegetação às perturbações. Por outro lado, *Cenostigma pyramidale* é mais comum em condições menos perturbadas, servindo como indicador de estabilidade ecológica nas áreas onde predomina (Moura, 2010). Essa combinação de espécies reforça o papel da CArA como uma tipologia transitória, refletindo tanto processos de degradação quanto de recuperação dentro da dinâmica ecológica da Caatinga.

No entanto, vale destacar que, em muitos casos, a persistência espacial da CArA não está associada a uma trajetória sucessional ativa, mas sim à permanência de um estado simplificado da vegetação. Essa condição permite propor uma distinção teórica entre dois tipos de estabilidade ecológica observados nas formações lenhosas da Caatinga: a estabilidade positiva, representada por tipologias como a CAD e a CAA, que mantém sua estrutura e funcionalidade mesmo sob pressões moderadas, preservando a resiliência e a capacidade de regeneração; e a estabilidade negativa, como observado nas formações como a CArA, que, embora estáveis em termos de ocupação territorial, permanecem estagnadas em um patamar estrutural e funcional reduzido, sem avançar em direção à estágios mais maduros de sucessão.

Figura 33 - Presença da *Mimosa tenuiflora* em área de pousio, indicando processo de regeneração.



Essa formulação encontra respaldo na teoria ecológica de sistemas em equilíbrio e não-equilíbrio, frequentemente aplicada a regiões semiáridas e áreas de pastagem, onde os distúrbios antrópicos contínuos, como o pastoreio e o uso intensivo do solo, impedem a recuperação ecológica, mantendo os sistemas em estados alternativos degradados (Vetter, 2005). A vegetação se estabiliza, portanto, não por resiliência ecológica, mas pela repetição dos impactos que impedem sua reorganização funcional. Essa lógica é amplamente evidenciada por Araújo et al. (2024), que demonstram que a expansão das formações arbustivas da Caatinga está diretamente associada ao uso da terra e não a padrões naturais.

Essa condição de estabilidade degradada é também discutida por Nunes et al. (2020), Schulz et al. (2018) e Silva et al. (2020), que mostram como a intensificação do pastoreio e da agricultura leva à perda de biomassa lenhosa e ao empobrecimento estrutural da vegetação. De forma complementar, Sfair et al. (2018) e Ribeiro et al. (2015) argumentam que distúrbios antrópicos conduzem ao declínio da diversidade biológica e à interrupção dos processos sucessionais, criando sistemas vegetacionais resistentes a regeneração ecológica. Nesse cenário, a estabilidade negativa deve ser entendida como um estado de não-equilíbrio ecológico, onde a vegetação mantém sua funcionalidade limitada, presa a um platô ecológico funcional simplificado.

Essa condição se torna ainda mais preocupante ao se observar a dinâmica temporal das tipologias da Caatinga, como a CAA, cuja trajetória recente ilustra um processo de perturbação

e tentativa de recuperação. Embora a CAA seja o tipo de vetor mais representativo em termos de área, sua tendência em geral para o período em consideração é de diminuição, de 206,42 km<sup>2</sup> em 2016 para 169,48 km<sup>2</sup> no final de 2024. A perda de área é uma indicação de ocorrência e degradação lenta e prolongada, que provavelmente aumenta com a intensificação das pressões ambiental e antropogênica. No entanto, a perda é especialmente proeminente em 2020 e mostra um aumento gradual ao longo dos próximos anos, até 2024.

Esse padrão evidencia uma dinâmica de perturbação ecológica, que inicialmente reduziu a cobertura dessa tipologia, seguida por um processo de recuperação. Essa recuperação sugere que, diante de uma redução temporária nas perturbações ambientais, áreas arbustivas e menos densas passaram por um processo de sucessão ecológica, desenvolvendo gradualmente uma composição mais arbórea e estruturada. A variação na proporção desta tipologia ao longo do período, reforça esta dinâmica, apontando a resiliência apresentada pela CAA e sua capacidade de resposta às mudanças nas condições ambientais. Essa trajetória ilustra um exemplo de estabilidade positiva, no qual a vegetação, mesmo impactada, consegue manter um ciclo funcional de reorganização e recuperação ecológica.

A CAD apresenta uma estabilidade relativa ao longo do período analisado, com variações menores em sua área ocupada, apresenta oscilações entre 26,02 km<sup>2</sup> em 2017 e 31,65 km<sup>2</sup> em 2020. A proporção também se mantém quase constante, significando que esta tipologia é menos suscetível a mudanças rápidas e indica um estado mais estabilizado.

Essa estabilidade contrasta com as demais tipologias, que mostram maior vulnerabilidade às perturbações, e reforça o conceito de estabilidade positiva. A localização predominante do CAD em encostas de relevos residuais e fundos de vales, áreas de difícil acesso, contribui para sua preservação. Com declividade média de 29,01%, essas regiões apresentam menor suscetibilidade a intervenções humanas, como agricultura e pastoreio, favorecendo a manutenção de sua densidade e diversidade vegetativa. Estudos como os de Rodal et al. (2008) e Francisco et al. (2012) corroboram essa observação, apontando que o adensamento vegetal em áreas de relevo acidentadas reforça a configuração espacial que promove a estabilidade e preservação da vegetação arbórea densa na Caatinga.

A CArAA também apresenta flutuações significativas, com redução de área entre 2016 (141,36 km<sup>2</sup>) e 2023 (112,82 km<sup>2</sup>). Essa diminuição é evidenciada no gráfico, onde a proporção dessa tipologia sofre declínio, sugerindo que ela é mais vulnerável a perturbações que impedem a sua regeneração e promovem regressão para tipologias de menor porte, como CArA. Nesse caso, a CArAA representa um estado mais instável e suscetível à transição negativa, onde a

ausência de resiliência funcional diante de distúrbios crônicos pode comprometer sua evolução sucessional.

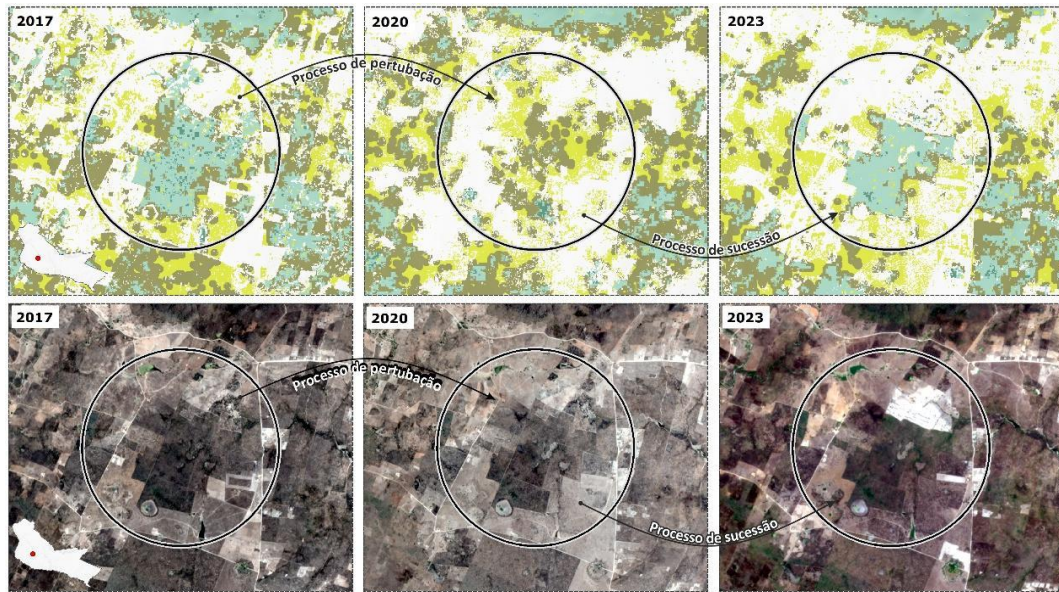
De forma interessante, em 2020, a CArAA atingiu a sua maior extensão, com 151,64 km<sup>2</sup>, enquanto a CAA sofreu uma redução significativa, de 203,72 km<sup>2</sup> em 2019 para 178,37 km<sup>2</sup>. O aumento da CArAA e a diminuição simultânea da CArA mostram um processo dinâmico no qual áreas mais arbustivas e arbóreas abertas contribuem para a expansão temporária das formações arbustivo-arbóreas. A interação entre essas tipologias reforça como mudanças em uma formação podem influenciar diretamente a dinâmica e o estado das demais, exemplificando o contínuo ciclo de perturbações e sucessões, nos quais os processos de estabilidade se intercalam espacial e temporalmente, na caracterização da Caatinga Lenhosa.

Tais dados, portanto, evidenciam a complexidade dos padrões vegetativos da Caatinga Lenhosa, mostrando como as dinâmicas de pressão humana e condições ecológicas impactam na configuração das tipologias. A articulação entre diferentes estados de estabilidade, positiva e negativa, reforça a importância de estratégias que priorizem o monitoramento contínuo e o manejo adaptativo, essenciais à conservação das tipologias mais vulneráveis e à manutenção da biodiversidade regional.

#### 4.5 ESTADOS DINÂMICOS DAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA

A análise da relação entre as tipologias da Caatinga (**Figura 23**) e a evolução da vegetação lenhosa (**Figura 31**) revela padrões claros de perturbação e sucessão (recuperação). Áreas originalmente desprovidas de vegetação tendem a desenvolver gradualmente um estrato arbustivo aberto, que, ao longo do tempo, pode evoluir para composições mistas, com presença de elementos arbóreos e arbustivos, ou vice-versa, conforme ilustrado na **Figura 34**.

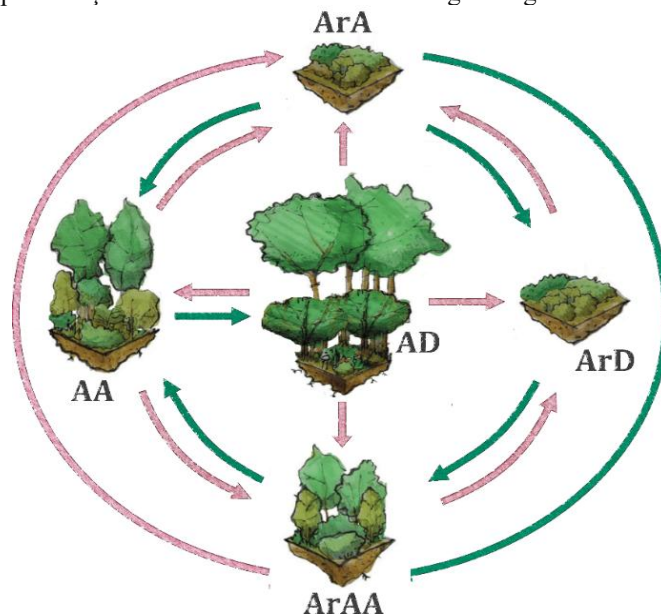
Figura 34 - Ciclo de sucessão e perturbação da vegetação lenhosa da caatinga presente na área de estudo.



Fonte: O autor

Entretanto, em função de perturbações contínuas, essas áreas muitas vezes não avançam para estágios mais densos, podendo até regredir para estados sem cobertura vegetal. Esse ciclo dinâmico destaca a resiliência das tipologias e dos seus estados frente às mudanças e pressões ambientais, além de evidenciar como a ação humana influencia diretamente essas transformações. Desta maneira, para melhor compreensão deste ciclo dinâmico, a **Figura 35** ilustra os diferentes estágios vegetativos e os processos de sucessão e perturbação que moldam os estados dinâmicos das tipologias da Caatinga

Figura 35 - Representação dos ciclos dinâmicos dos estágios vegetativos da caatinga lenhosa



Fonte: Brito *et al* (2021), adaptado pelo autor

Esta representação permite compreender em detalhes como as diferentes tipologias da Caatinga Lenhosa se transformam ao longo do tempo, adaptando-se, regredindo ou evoluindo sua composição florística. As transições entre as tipologias são guiadas por processos de sucessão, estabilização e perturbação, que refletem as condições ecológicas e antrópicas que promovem ou limitam esses Estados Dinâmicos. As características dessas transições mostram como cada tipologia responde a esses processos, evidenciando a resiliência e os desafios enfrentados pelas formações vegetais da Caatinga.

A Caatinga Arbustiva Aberta (CArA) pode se formar por sucessão (FS-CArA), um estado serial, em áreas previamente degradadas, sem vegetação, que evoluem para uma cobertura arbustiva aberta durante os estágios iniciais de sucessão ecológica. No entanto, pode surgir também por perturbação (FP-CArA), representando estados derivados, onde áreas de tipologias mais ricas sofrem degradação e resultam em vegetação arbustiva aberta. Quando estabilizada (EE-CArA), a vegetação arbustiva aberta persiste sem degradação suficiente para se tornar desmatada e nem apresenta regeneração que permita avançar para estágios mais arbóreos, como ArAA ou AA, demonstrando pressões contínuas de distúrbios.

A Caatinga Arbórea Aberta (CAA) surge por sucessão (FS-CAA), estabelecendo-se em estado serial, a partir de vegetações arbustivas, como ArA ou ArD, ou mistas, como ArAA, evoluindo para uma tipologia arbórea aberta. Por outro lado, pode resultar de perturbações (FP-CAA), estado derivado, de tipologias mais densas e ricas, como CAD, que, ao sofrerem distúrbios, originam uma vegetação menos densa. Quando estabilizada, quase-nativo (EE-CAA), a CAA representa um estágio de equilíbrio em que a vegetação não sofreu degradação suficiente para regredir a um estado mais arbustivo, nem apresentou condições para avançar a uma estrutura mais densa, como AD.

A Caatinga Arbórea Densa (CAD) forma-se principalmente pela sucessão ecológica e o estado serial (FS-CAD) de tipologias de menor porte e densidade, como ArA, ArD, ArAA ou AA, mas a transição mais comum ocorre a partir de vegetação arbórea aberta (AA). Em seu estado estabilizado ou nativo (EE-CAD), a vegetação arbórea densa não sofre perturbações suficientes para regredir a um porte arbóreo menos denso, como AA, ou arbustivo, como ArA ou ArAA.

A Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta (CArAA) se estabelece pela sucessão ou serial (FS-CArAA) de vegetações predominantemente arbustivas, como ArA ou ArD, para uma tipologia mista, caracterizada pela coexistência de elementos arbustivos e arbóreos. Pode também surgir devido a perturbações (FP-CArAA), de estados derivados, de tipologias mais



arbóreas, como AA ou AD, que, ao sofrerem distúrbios, resultam em uma tipologia mista. Quando estabilizada (EE-CArAA), a tipologia representa um estado quase-nativo, onde a vegetação arbustiva-arbórea aberta persiste sem degradação suficiente para regredir a um estado mais arbustivo, nem apresenta regeneração natural suficiente para avançar a estágios arbóreos mais desenvolvidos, como CAA ou CAD.

Esta tipologia pode atuar entre tipos diferentes de formação, com crescimento mais ou menos denso, e pode ser o resultado do adensamento por sucessão ecológica. O aumento da área para este tipo de vegetação pode ser um dos indicadores de mudanças ecológicas mais amplas, sugerindo uma tendência de fechamento do dossel ou um aumento na heterogeneidade do habitat, o que impacta diretamente a biodiversidade e os processos ecológicos locais.

A seguir, é apresentando um quadro resumo das tipologias da Caatinga (**Quadro 5**), no qual sintetiza a formação dos estados dinâmicos das tipologias (formação por sucessão, formação por perturbação, estado estabilizado).

Quadro 5 - Resumo dos estados dinâmicos das tipologias da caatinga da área de estudo

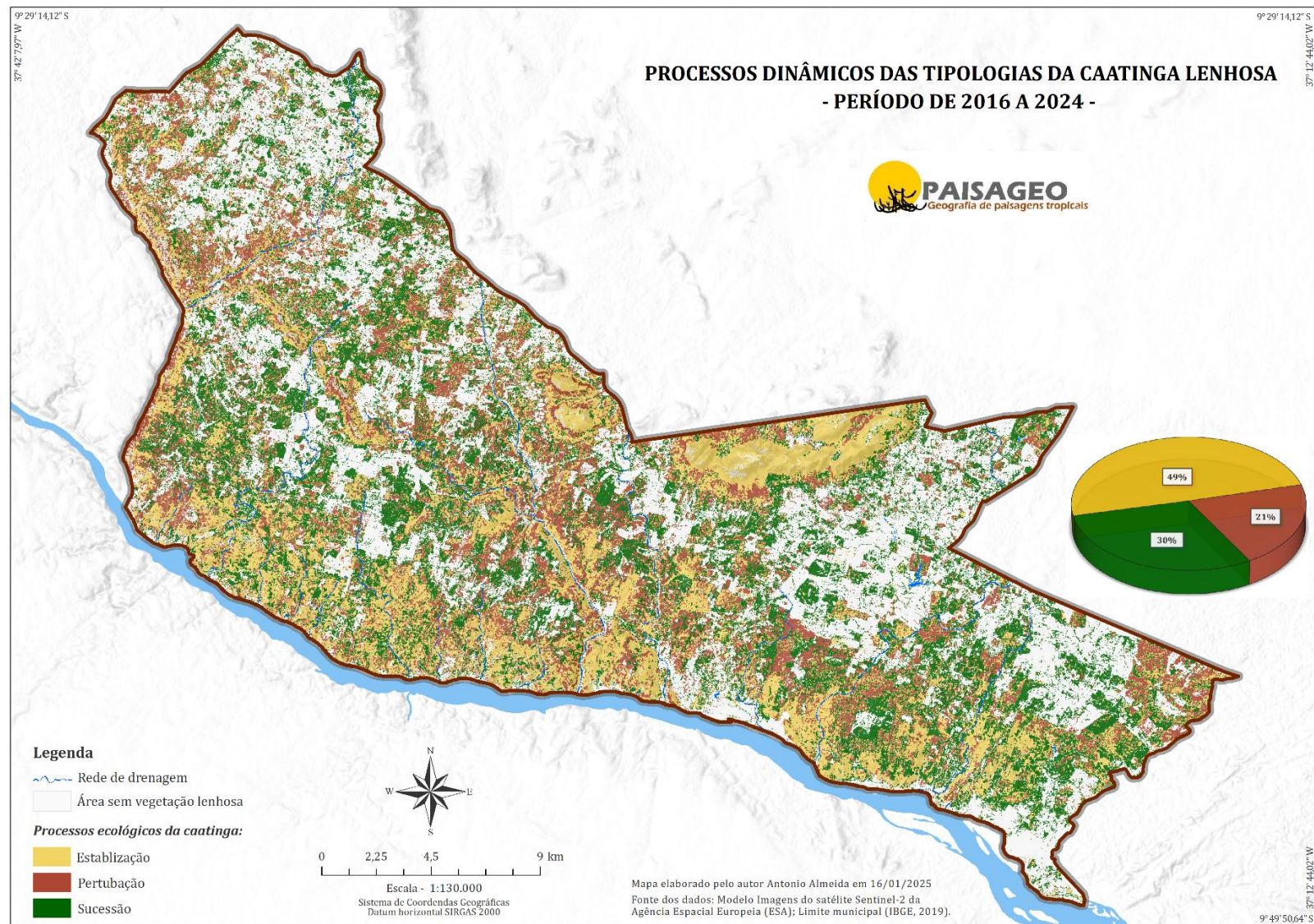
Tipologia	Formação por Sucessão	Formação por Perturbação	Estado Estabilizado	Implicações Ecológicas
<b>CArA</b>	Evolui de áreas degradadas para vegetação arbustiva aberta (FS-CArA), predominante em estados seriais.	Resulta da degradação de tipologias mais ricas, originando vegetação arbustiva aberta (FP-CArA), representando estados derivados.	Persiste sem degradação suficiente para desmatamento ou regeneração para tipologias arbóreas (EE-CArA), típico de estados quase-nativos.	Indicador de distúrbios contínuos; impacta a biodiversidade e os processos ecológicos, sendo comum em áreas de uso intensivo.
<b>CAA</b>	Evolui de vegetações arbustivas ou mistas para tipologia arbórea aberta (FS-CAA), associado a estados seriais.	Resulta da degradação de tipologias mais densas (ex., CAD), originando vegetação arbórea aberta (FP-CAA), típico de estados derivados.	Representa equilíbrio, sem regressão para arbustiva ou avanço para uma estrutura arbórea mais densa (EE-CAA), em estados quase-nativos.	Contribui para diversidade de habitats; representa um balanço na estrutura da vegetação, sensível a distúrbios moderados e intensivos.
<b>CAD</b>	Transita de vegetação arbustiva ou arbórea menos densa para arbórea densa, frequentemente de AA para CAD (FS-CAD).	Menos comum por degradação; forma-se principalmente por sucessão, caracterizando estados nativos.	Mantém-se como vegetação arbórea densa, sem degradação para arbórea aberta ou arbustiva (EE-CAD), representando estados nativos.	Essencial para manter estruturas florestais densas; suporta alta biodiversidade e atua como indicadora de áreas com menor impacto antrópico.

<b>CArAA</b>	Evolui de vegetações predominantemente arbustivas para uma tipologia mista (arbustiva-arbórea aberta) (FS-CArAA).	Resulta da degradação de tipologias arbóreas (ex., AA, AD), originando vegetação mista (FP-CArAA), característico de estados derivados	Persiste como zona de transição, sem regressão significativa ou avanço para estágios arbóreos mais densos (EE-CArAA), em estados quase-nativos.	Atua como indicador de mudanças ecológicas ou heterogeneidade do habitat; reflete aumento da densidade ou mudanças no dossel.
--------------	---	--	---	---

Fonte: O autor

Na Caatinga Lenhosa da área de estudo, entre 2016 e 2024, foram observadas dinâmicas que evidenciam interações entre processos de sucessão, perturbação e estabilização, destacando os limites ecológicos das tipologias vegetais da Caatinga (**Figura 36**). Os processos de sucessão, em particular, incluem estágios de sucessão ecológica como climax, subclimax e disclimax, refletindo a capacidade da vegetação de se regenerar e evoluir em resposta a diferentes condições ambientais e ações antrópicas.

Figura 36 - Processos ecológicos das tipologias da caatinga lenhosa no período de 2016-2024.



Fonte: O autor

Com base na **Tabela 9**, que descreve as dinâmicas das tipologias da Caatinga lenhosa, é possível observar como os processos dinâmicos de estabilização, sucessão e perturbação estão associados à influência de distúrbios antrópicos sobre a estrutura vegetal. Esses distúrbios desempenham um papel central na alteração das tipologias, comprometendo a complexidade estrutural e a funcionalidade ecológica da vegetação da Caatinga.

Tabela 9 - Dinâmicas das tipologias da caatinga lenhosa no período de 2016-2024.

Mudança Tipológica	Estado Ecológico	Estágio de sucessão (Clements)	Estados Dinâmicos (Sotchava)	Estado Dinâmico Tipologia	2016 - 2024	
					Área km <sup>2</sup>	%
CArA	estabilização	–	Quase-nativo	EE-CArA	12,39	3,22
CAA ->CArA	perturbação		Derivados	FP-CArA	10,86	2,83
CAD ->CArA	perturbação	–	Derivados	FP-CArA	0,03	0,01
CArAA - >CArA	perturbação	–	Derivados	FP-CArA	25,48	6,63
D ->CArA	sucessão	disclimax	Serial	FS-CArA	25,23	6,56
CAA	estabilização	–	Quase-nativo	EE-CAA	124,89	32,50
CAD ->CAA	perturbação	–	Derivados	FP-CAA	6,73	1,75
CArA ->CAA	sucessão	subclimax	Serial	FS-CAA	6,75	1,76
CArAA - >CAA	sucessão	subclimax	Serial	FS-CAA	24,92	6,48
CAD	estabilização	–	Nativo	EE-CAD	18,58	4,83
CArA ->CAD	sucessão	climax	Serial	FS-CAD	0,31	0,08
CAA ->CAD	sucessão	climax	Serial	FS-CAD	8,08	2,10
CArAA - >CAD	sucessão	climax	Serial	FS-CAD	0,72	0,19
CArAA	estabilização	–	Quase-nativo	EE-CArAA	45,52	11,84
CAA - >CArAA	perturbação	–	Derivados	FP-CArAA	40,05	10,42
CAD - >CArAA	perturbação	–	Derivados	FP-CArAA	0,17	0,04
D ->CArAA	sucessão	disclimax	Serial	FS-CArAA	22,9	5,96
CArA- >CArAA	sucessão	disclimax	Serial	FS-CArAA	10,72	2,79
<b>Total</b>					<b>384,33</b>	<b>100,0</b>

Legenda: D – área degradada; CArA - Caatinga Arbustiva aberta; CAA – Caatinga Arbórea Aberta; CAD – Caatinga Arbórea Densa; CArAA – Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta; FS- Formado por Sucessão; EE – Estado Estabilizado; FP – Formado por Perturbação. Fonte: O autor

Os resultados indicam que grande parte das transições identificadas na tabela aponta para dinâmicas de perturbação e sucessão que refletem o impacto das perturbações humanas, responsáveis por modificar os estados ecológicos das tipologias.

Os dados indicam que 32,38% da área total (127,08 km<sup>2</sup>) se mantém estabilizada, principalmente na tipologia CAA. Isso sugere que certas áreas, apesar de sujeitas a condições adversas, ainda conseguem manter sua estrutura vegetal sem alterações significativas. Porém, é importante avaliar se essa estabilização é decorrente de resiliência ambiental ou se reflete áreas com menor pressão antrópica. A estabilização na Caatinga pode indicar regiões mais protegidas ou com menor impacto direto de atividades humanas, mas sua predominância em apenas uma tipologia sugere que as demais estão altamente suscetíveis a mudanças.

As perturbações, sejam naturais ou antrópicas, frequentemente resultam em uma regressão de estados vegetativos mais complexos para formas menos densas e mais expostas. As perturbações identificadas, como a transição de CAA para CArA (7,85%, 30,81 km<sup>2</sup>), revelam a degradação da tipologia mais complexa para uma estrutura mais simples. Esse processo indica a redução da biomassa, perda de cobertura arbórea e declínio dos serviços ecossistêmicos oferecidos pela vegetação original. Outras transições associadas à perturbação, como CAA para CArA e CArAA, reforçam o papel das atividades antrópicas na perda da complexidade vegetal e na maior vulnerabilidade ecológica.

Conforme a sucessão ecológica avança, uma comunidade vegetal tende a aumentar sua complexidade, tanto em termos de biomassa quanto na eficiência do fluxo de energia, porém, as práticas humanas mantêm frequentemente os ecossistemas em estágios sucessórios iniciais e menos estáveis para otimizar a extração de recursos (Odum, 1969).

Nos estados dinâmicos de sucessão (serial) é observado áreas que passam pelos estágios de disclímax, subclímax e clímax, evidenciando diferentes graus de regeneração ou degradação da vegetação. O estágio de disclímax, como na transição de área degradada para CArA (5,69%, 22,34 km<sup>2</sup>), representa áreas severamente perturbadas, onde a vegetação não consegue retornar ao seu estado original devido à pressão contínua de distúrbios. Por outro lado, os estágios de subclímax (7,32%, 28,74 km<sup>2</sup>, como na transição de CAA para CArA) sugerem uma regeneração parcial, enquanto o clímax (2,60%, 10,19 km<sup>2</sup>, como na transição de CAA para CAD) representa áreas que alcançam um estado ecológico mais estável e funcional.

A regeneração de áreas perturbadas é um processo crucial na dinâmica do ecossistema e evidencia a recuperação gradual de áreas anteriormente degradadas ou perturbadas, com transições significativas (Noutcheu et al., 2024).

A prevalência de áreas em subclímax e disclímax demonstra que grande parte da Caatinga lenhosa está em um estado intermediário ou degradado, o que reflete a dificuldade de regeneração diante da intensidade dos distúrbios antrópicos. É importante destacar também que 11,51% do total da cobertura vegetal corresponde a áreas que evoluíram de locais anteriormente sem vegetação ou degradados para áreas de vegetação com porte arbustivo, evidenciando o dinamismo e a resposta da vegetação às intervenções humanas.

A análise das mudanças tipológicas mostra que as perturbações antrópicas não apenas comprometem a estrutura vegetal, mas também dificultam a regeneração e transição para estágios mais complexos, como o clímax. As transições negativas, como CAA para CArA, ilustram o enfraquecimento das tipologias arbóreas e densas, substituídas por formações arbustivas e abertas.

A premissa central desta pesquisa, de que as alterações das tipologias permitem compreender os impactos dos distúrbios antrópicos, é amplamente corroborada com os dados da tabela acima. As mudanças observadas refletem diferentes níveis de degradação e regeneração, revelando como as tipologias respondem às perturbações. Por exemplo, a transição de CArAA para CAD (sucessão – clímax) demonstra resiliência em áreas menos impactadas, enquanto a transição de CAD para CArA (perturbação) evidencia a perda de complexidade estrutural em áreas degradadas.

#### 4.6 CONCLUSÃO

Os resultados sobre o mapeamento e a dinâmica das tipologias lenhosa da Caatinga evidenciam uma complexidade ecológica e a interação entre processos de sucessão, estabilização e perturbação, determinantes para a configuração e transformação da paisagem semiárida.

A Caatinga na área de estudo apresenta uma heterogeneidade quanto aos tipos de vegetativa, refletida nas diferentes tipologias mapeadas, como a CArA, CAA, CAD e CArAA. Essas tipologias são moldadas tanto por condições ambientais quanto por pressões antrópicas. A análise das transições revelou a sensibilidade de algumas tipologias às perturbações, como a

CArA, que frequentemente reflete a degradação ambiental, e a CAA, que demonstrou resiliência relativa e capacidade de regeneração.

As Perturbações Antrópicas, como o desmatamento, o pastoreio e o uso inadequado do solo, aparecem como as principais causas de perturbação, promovendo regressão de estados vegetativos mais complexos para formações menos densas e mais vulneráveis. Entretanto, em áreas onde as intervenções humanas eram mínimas ou inexistentes, foram registradas evidências de regeneração natural, nas quais os estados vegetativamente abertos estavam se transformando gradualmente em formações mais densas.

Portanto, os resultados aqui apresentados confirmam a importância do monitoramento contínuo da dinâmica da vegetação, como uma ferramenta crítica para identificar tendências e informar a função de estratégias de manejo sustentável. Enquanto a proteção intensiva exigida por uma área como a CAD é contínua, tipologias como a CArA requerem intervenção de restauração ecológica para recuperar sua funcionalidade e biodiversidade. Assim, os resultados apresentados enfatizam a importância de ações integradas de conservação que considerem a dinâmica espacial e temporal da tipologia Caatinga e, assim, contribuam para mitigar os impactos das atividades humanas e a sustentabilidade do bioma.

## **5 RELAÇÕES ENTRE O ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO EM DIFERENTES FORMAÇÕES E ESTÁGIOS SUCESSIONAIS DE CAATINGA**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

A vegetação desempenha um papel fundamental na manutenção dos processos ecológicos e na estabilidade dos ecossistemas, atuando diretamente na ciclagem de nutrientes, na regulação do microclima e na mitigação dos impactos de mudanças ambientais. Além de seu papel ecológico, a vegetação influencia significativamente a resiliência dos ecossistemas frente às variações climáticas e às pressões antrópicas, sendo sua dinâmica fortemente condicionada pela disponibilidade hídrica (Sánchez-Azofeifa et al., 2005; Enquist e Enquist, 2011).

Dentre os elementos que influenciam o crescimento e a produtividade da vegetação, destaca-se a precipitação como uma das mais determinantes, especialmente em ecossistemas áridos e semiáridos. A quantidade retida de chuva que permanece no solo na forma de umidade exerce uma influência direta sobre a biomassa vegetal (Collins et al., 2014). Em ecossistemas como a Caatinga, a água exerce um papel crucial, não apenas por sua escassez, mas também em razão de sua distribuição temporal irregular, afetando diretamente a fenologia e a estrutura da vegetação (Zhou et al., 2017; Nemani et al., 2003; Snyder e Tartowski, 2006).

A Caatinga, com seu sistema hídrico sazonal e longos períodos de seca, é caracterizada por uma elevada variabilidade na precipitação intra e interanual. Em função desse contexto, a vegetação criou estratégias de adaptação, como a queda das folhas, sistemas hidráulicos eficazes e alta resistência à escassez de água (Goirán et al., 2012). Essa variação entre períodos chuvosos e secos apresenta desafios extras para a preservação da vegetação, fazendo da variabilidade pluviométrica um elemento essencial para entender sua dinâmica (Sparacino e Espindola, 2021).

Contudo, além da variabilidade climática, a dinâmica da vegetação na Caatinga é fortemente influenciada por crescentes pressões antrópicas. Mudanças climáticas e ações humanas, como o uso intensivo do solo, são reconhecidas como forças primárias que moldam a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas, despertando crescente interesse científico quanto aos seus impactos sobre o desenvolvimento da vegetação (Chen et al., 2015; Jiapaer et al., 2015; Kong et al., 2020).

A Caatinga possui elevada relevância ecológica, social e cultural, sendo estreitamente associada às práticas da agricultura familiar e da pecuária, que dependem dos serviços



ecossistêmicos prestados pela vegetação (Buainain e Garcia, 2013; Souza Junior et al., 2022). No entanto, esse modelo de uso, somado à extração de recursos, ao desmatamento e à expansão urbana, tem promovido um processo contínuo de degradação ambiental, comprometendo a biodiversidade e a capacidade de resiliência do bioma (Silva et al., 2017).

As Perturbações Antrópicas Crônicas (PAC), como a substituição da vegetação nativa por agropecuária e o manejo inadequado do solo, promovem a perda de biodiversidade, a degradação do solo e a fragmentação da paisagem (Rito et al., 2017; Antongiovanni et al., 2020). Além disso, a fragmentação reduz a conectividade das áreas vegetadas, dificultam a regeneração natural, comprometem a retenção hídrica do solo e intensificam os efeitos das secas. Nesse contexto, destacam-se três tipos principais de perturbação: mudanças abruptas, perturbações crônicas e invasão de espécies exóticas (Souza Junior et al., 2022).

O monitoramento das alterações na vegetação é fundamental para compreender os impactos das mudanças climáticas e das atividades humanas na Caatinga. O avanço do sensoriamento remoto, aliado à computação em nuvem, tem viabilizado análises em larga escala, permitindo detectar padrões de degradação, regeneração e variações sazonais na cobertura vegetal (Souza Junior et al., 2022).

Modelos que utilizam dados orbitais têm sido frequentemente empregados para identificar alterações na vegetação e entender os elementos que provocam essas mudanças (Kattenborn et al., 2021; Gao et al., 2020). Em regiões semiáridas, pesquisas têm apontando tendências divergentes, com áreas exibindo um "esverdeamento" ligado às mudanças climáticas, enquanto outras revelam transformações aceleradas (Jong et al., 2011; Zhao, 2010; Fensholt et al., 2012). No semiárido nordestino, essas variações destacam a importância de combinar fatores climáticos e humanos nos estudos (Barbosa et al., 2006; Schucknecht et al., 2013).

Neste contexto, o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) vem se mostrando uma métrica eficaz na avaliação da dinâmica vegetal na Caatinga. Sobretudo, por demonstrar vantagens sobre outros índices espectrais devido à sua menor suscetibilidade a interferências do solo e de aerossóis (Almeida et al., 2019; Medeiros et al., 2022; Cunha et al., 2020; Silva et al., 2024). Estudos evidenciam que EVI pode proporcionar uma maior precisão na detecção da biomassa, da estrutura da vegetação e da fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida, tornando uma ferramenta eficaz para monitorar variações sazonais, interanuais e de longo prazo na dinâmica da vegetação (Liu e Huete, 1995; Gao et al., 2000; Gurung et al., 2009; Huete et al., 2002).

Diante desse cenário, este capítulo tem como objetivo analisar a relação entre a produtividade da vegetação lenhosa da Caatinga e a precipitação ao longo de uma série temporal de oito anos (2016 a 2024), utilizando o Índice EVI como indicador da dinâmica vegetacional. Além de investigar as tendências interanuais na cobertura vegetal, busca-se compreender como fatores climáticos, com ênfase nos eventos associados ao fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENSO), e as perturbações antrópicas interagem para modular a estrutura e o funcionamento das diferentes tipologias da Caatinga e seus respectivos estados dinâmicos.

A hipótese central desta análise é que a produtividade da vegetação lenhosa da Caatinga está positivamente correlacionada à precipitação, sobretudo em vegetação mais densas, favorecendo maior acúmulo de biomassa e diversidade estrutural. No entanto, considera-se que a resposta da vegetação a esse fator climático varia conforme a tipologia e o estado dinâmico em que se encontra, sendo modulada pelas perturbações antrópicas, que reduzem sua resiliência ecológica e comprometem sua capacidade de recuperação frente às oscilações climáticas.

## 5.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A análise da relação entre o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) e a produtividade da vegetação lenhosa da Caatinga exigiu uma abordagem metodológica baseada em sensoriamento remoto, estatística espacial e análise de séries temporais. Empregando, para isso, dados espectrais, climáticos e ambientais, permitindo a avaliação das variações na vegetação em função de fatores abióticos e antropogênicos ao longo do tempo.

Os procedimentos adotados foram estruturados para garantir uma avaliação robusta das tendências do EVI e de sua relação com a precipitação e a variabilidade climática, considerando as diferenças entre tipologias da Caatinga e seus respectivos estados dinâmicos. Assim, foram combinadas técnicas de análise espacial e temporal, incluindo a detecção de tendências estatísticas, cálculos de variabilidade e correlações com fatores climáticos.

### 5.2.1 Aquisição de Dados e Pré-Processamento

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de diferentes fontes remotas e climáticas, garantindo ampla cobertura espacial e temporal para a análise da produtividade da vegetação lenhosa da Caatinga com base no Índice de Vegetação Melhorado (EVI). O pré-processamento foi conduzido com foco na padronização e compatibilização dos dados,

assegurando a comparabilidade entre as distintas tipologias da Caatinga ao longo do período de 2016 a 2024.

#### 5.2.1.1 Dados do índice de vegetação

O Índice de Vegetação Melhorado (EVI) foi empregado como métrica principal para a avaliação da atividade da vegetação. Calculado a partir da razão entre as bandas do vermelho (RED), infravermelho próximo (NIR) e azul (BLUE), o EVI incorpora correções atmosféricas e do solo, conferindo maior sensibilidade em áreas de alta densidade de biomassa, reduzindo interferências de aerossóis e minimizando o ruído atmosférico, em comparação ao NDVI (Huete et al., 2002; Liu e Huete, 1995). A fórmula utilizada para o cálculo é:

$$EVI = G \cdot \frac{(NIR-RED)}{(NIR+C_1 \cdot RED-C_2 \cdot BLUE+L)} \quad (13)$$

Onde, *RED*, *BLUE* e *NIR* representam as medições de reflectância de superfície adquiridas nas regiões visível (vermelho e azul) e infravermelho próximo, respectivamente; enquanto *G* é o fator de ganho (2.5), *C<sub>1</sub>* e *C<sub>2</sub>* são coeficientes de correção atmosférica (6 e 7.5, respectivamente), e *L* é o fator de correção do solo (1).

O conjunto de dados EVI utilizado foi derivado de imagens mensais capturadas pelo sensor MSI do Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia (ESA), com resolução espacial de 10 metros e frequência de revisita de 10 dias desde 2016 (ESA, 2016). Para a análise, os valores mensais foram agregados em médias anuais, permitindo uma avaliação consistente da dinâmica da vegetação ao longo do período de estudo.

#### 5.2.1.2 Dados climáticos

A variabilidade climática foi avaliada com base nos dados de precipitação do CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*), que combina observações por satélite com medições de estações in situ, gerando séries temporais de precipitação com resolução espacial de 0,05° (~5,5 km) (Funk et al., 2015). Essa base de dados cobre latitudes entre 50°S e 50°N, com registros mensais disponíveis desde 1981, sendo amplamente utilizada para o monitoramento de tendências pluviométricas e eventos de seca (Funk et al., 2014).

Com o objetivo de compatibilizar a resolução dos dados pluviométricos com os demais produtos utilizados na análise, especialmente os índices espectrais derivados do Sentinel-2, foi aplicada uma técnica de suavização espacial baseada em média focal. Para isso, utilizou-se o operador focalMean (10, 'square'), que calcula a média da precipitação em uma vizinhança quadrada de 10 pixels, suavizando ruídos pontuais e variações abruptas não representativas do padrão espacial real da precipitação.

A integração dos dados do EVI com as séries temporais do CHIRPS permitiu investigar a influência das variações pluviométricas sobre a produtividade da vegetação. Para isso, foram utilizadas séries mensais médias de EVI e precipitação acumulada mensal, possibilitando a identificação de padrões sazonais e a realização de correlações entre os períodos secos e chuvosos e as respostas espectrais da vegetação.

#### 5.2.1.3 Dados Climáticos Globais

Visando avaliar possíveis influências de fenômenos climáticos globais, foram incorporados dados relacionados ao El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Os dados da Temperatura da Superfície do Mar (SST) foram obtidos do Climate Prediction Center (CPC) da NOAA, especificamente da região Niño 3.4, que corresponde à faixa do Oceano Pacífico equatorial onde as variações da SST possuem maior correlação com padrões climáticos globais (NOAA, 2024). A série histórica desses dados foi integrada às análises para identificar possíveis influências dos eventos El Niño e La Niña na dinâmica do EVI e nos padrões de precipitação da região.

#### 5.2.1.4 Plataforma de Processamento

Todo o processo de aquisição, extração e análise dos dados foi conduzido na plataforma Google Earth Engine (GEE), o que possibilitou o processamento em nuvem de grandes volumes de dados, a padronização das séries temporais e a realização de análises estatísticas e espaciais de forma integrada e eficiente.

#### 5.2.1.5 Integração com dados dos capítulos anteriores:

Os dados empregados neste capítulo foram refinados a partir das etapas metodológicas descritas nos Capítulos 3 e 4. A máscara de vegetação lenhosa, definida no Capítulo 3, foi aplicada para garantir que os índices fossem extraídos exclusivamente sobre áreas com cobertura lenhosa. A classificação tipológica estabelecida no Capítulo 4 possibilitou a diferenciação das análises entre as diferentes formações e estágios sucessionais da Caatinga, assegurando maior precisão na interpretação das variações espaço-temporais.

### 5.2.2 Método e Análise dos Dados

#### 5.2.2.1 Análise de tendências de Mann-Kendall da vegetação

O teste de Mann-Kendall (MK) é um método estatístico não paramétrico amplamente utilizado para identificar tendências em séries temporais, especialmente em dados ambientais, como índices de vegetação e padrões climáticos (Huang et al., 2022; Ndayisaba et al., 2017). Sua robustez decorre da independência em relação à distribuição dos dados e da tolerância a outliers, tornando-o ideal para análises de longo prazo.

Esse teste baseia-se na comparação sequencial de pontos de dados organizados cronologicamente. Cada valor é comparado com todos os subsequentes, formando pares de observações que permitem avaliar mudanças sistemáticas na magnitude dos valores ao longo do tempo (Jiang et al., 2015). A presença de uma tendência é determinada pela soma dos sinais de todas as comparações entre os pares de imagens (Tabari e Marofi, 2010). No entanto, embora o teste de Mann-Kendall seja eficaz na identificação da significância estatística da tendência em cada pixel, ele não fornece uma medida direta da magnitude dessa tendência.

Para identificar tendências temporais na produtividade da vegetação da Caatinga entre os anos de 2016 e 2024, o teste de Mann-Kendall foi aplicado ao Índice EVI. Esse procedimento permitiu detectar a existência de padrões de variação na vegetação ao longo do período analisado, contribuindo para a compreensão das dinâmicas ambientais da região.

O teste MK utiliza a estatística  $s$ , que é calculada a partir da soma dos sinais das diferenças entre pares de valores em uma série temporal. Essa abordagem permite avaliar a direção e a presença de uma tendência nos dados. A estatística  $S$  é definida pela seguinte equação:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (14)$$

onde a função sinal ( $\text{sgn}$ ) é usada para avaliar a diferença entre dois valores  $x_j$  e  $x_k$ , em tempos diferentes  $j$  e  $k$ , sendo definida como:

$$\text{gn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{se } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_j - x_k) = 0 \\ +1, & \text{se } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

A variância de  $S$ , representada como  $\text{Var}(S)$ , é ajustada para considerar empates nos dados, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (17)$$

Onde,  $n$  é o número total de observações,  $t_p$  é o número de valores empatados para um dado  $p$  e  $q$  é o número total de grupos de empates.

A estatística padronizada  $Z$ , derivada  $S$  e  $\text{Var}(S)$ , é utilizada para avaliar a significância da tendência:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (18)$$

Se o valor absoluto de  $Z$  exceder 1,96, a tendência é considerada estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95% (Mallick et al., 2021). Valores positivos de  $Z$  indicam uma tendência ascendente, enquanto valores negativos apontam para uma tendência descendente (Gadedjisso-Tossou et al., 2021).

### 5.2.2.2 Estimador de Inclinação de Sen

O Estimador de Inclinação de Sen é um teste estatístico não paramétrico amplamente utilizado para quantificar a magnitude das tendências observadas em séries temporais. Esse método complementa o teste de Mann-Kendall (MK) ao calcular a inclinação de uma tendência linear com base na mediana das inclinações entre todos os pares possíveis de pontos de dados, tornando-se uma abordagem robusta e resistente a outliers. Por essa razão, é particularmente adequado para análises ambientais e climáticas (Gocic e Trajkovic, 2013).

Na presente análise, o Estimador de Inclinação de Sen foi empregado para complementar o teste de Mann-Kendall, permitindo não apenas detectar tendências estatisticamente significativas, mas também quantificar sua magnitude. Essa abordagem foi fundamental para identificar áreas críticas de variação e compreender os impactos de fatores externos na dinâmica ecológica da Caatinga.

A principal vantagem do Estimador de Sen reside em sua robustez e confiabilidade, especialmente em séries temporais com flutuações abruptas ou dados extremos. Ao utilizar a mediana das inclinações entre pares de valores, esse método reduz a influência de valores atípicos, proporcionando uma estimativa mais precisa da tendência real (Agarwal et al., 2021; Ray et al., 2021).

Além disso, a inclinação de Sen é ideal para identificar padrões lineares de variação, mesmo na presença de outliers, fornecendo uma medida clara da magnitude das tendências observadas. Sua aplicação combinada com o teste de Mann-Kendall fortalece a análise de séries temporais ambientais, garantindo maior precisão e confiabilidade nos resultados (Ali et al., 2019; Ndayisaba et al., 2017).

A inclinação ( $Q_i$ ) no Estimador de Sen é calculada como:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (19)$$

Onde  $x_j$  e  $x_k$  são valores em tempos  $j$  e  $k$ , com  $j > k$ . A mediana das inclinações ( $Q_{med}$ ) é utilizada para representar a magnitude da tendência, sendo definida como:

$$Q_{med} = \begin{cases} Q \left[ \frac{N+1}{2} \right] & \text{se } N \text{ é ímpar} \\ \frac{Q \left[ \frac{N}{2} \right] + Q \left[ \frac{N+2}{2} \right]}{2} & \text{se } N \text{ é par} \end{cases} \quad (20)$$

O valor de  $Q_{med}$  fornece a variação média anual do índice analisado, permitindo a quantificação clara da intensidade da mudança (Agarwal et al., 2021).

### 5.2.2.3 Coeficiente de Variação do EVI

O Coeficiente de Variação ( $Cv$ ) é uma métrica estatística amplamente utilizada para avaliar a estabilidade e a variabilidade de séries temporais ambientais, permitindo analisar a flutuação interanual da vegetação ao longo do tempo. Neste estudo, o  $Cv$  foi aplicado aos valores do Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) no período de 2016 a 2024, possibilitando a identificação de padrões de estabilidade e mudança na produtividade vegetal das tipologias da Caatinga.

O coeficiente de variação é definido como a razão entre o desvio padrão e a média dos valores da série temporal, sendo expresso pela seguinte equação (Raun et al., 2005):

$$Cv = \left( \frac{\sigma_{EVI}}{EVI} \right) \times 100 \quad (21)$$

Onde,  $Cv$  representa o coeficiente de variação do EVI (expressado em porcentagem);  $\sigma_{EVI}$  é o desvio padrão dos valores de EVI ao longo do tempo, refletindo o grau de dispersão dos dados;  $EVI$  é a média dos valores do EVI para o período de 2016 a 2024.

O coeficiente de variação foi calculado em escala de pixels para avaliar a estabilidade da vegetação no tempo, permitindo a comparação entre diferentes tipologias da Caatinga. Conforme sugerido por Alharbi et al. (2019) e Raun et al. (2005), um valor alto de  $Cv$  indica uma maior dispersão dos dados e maior variação interanual na resposta da vegetação, enquanto valores mais baixos refletem uma distribuição mais homogênea e uma variação estável ao longo do tempo.

A interpretação dos valores obtidos permitiu identificar áreas mais vulneráveis às mudanças ambientais, onde a vegetação apresenta maior variabilidade no tempo, além de regiões mais estáveis, possivelmente associadas a processos ecológicos de sucessão. A espacialização dos valores de  $Cv$  foi realizada por meio de mapas temáticos, destacando as regiões com maior e menor estabilidade da vegetação da Caatinga



#### 5.2.2.4 Análise de correlação parcial

A relação entre a dinâmica da vegetação e a variabilidade climática, foi avaliada por meio da correlação de Pearson ( $r$ ) entre o EVI e os dados de precipitação, entre 2016 a 2024. Aplicado ao nível de píxel, a análise permitiu identificar padrões espaciais em resposta da vegetação à disponibilidade hídrica, proporcionando uma avaliação quantitativa da influência das variações pluviométricas. No entanto, a correlação linear pode não capturar integralmente a complexidade dessa relação, uma vez que fatores como variabilidade sazonal, desta maneira, eventos climáticos extremos e características ambientais locais podem influenciar a resposta da vegetação, limitando a precisão dos resultados (Mehmood et al., 2024; Wang et al., 2022).

Para realizar a análise, foram utilizados valores médios mensais de EVI extraídos de imagens de sensoriamento remoto e dados de precipitação correspondentes, garantindo a compatibilidade temporal entre as variáveis. O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado conforme a equação a seguir:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (22)$$

Onde,  $x_i$  e  $y_i$  representam os valores de EVI e precipitação em um determinado píxel ao longo do período analisado, enquanto  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  correspondem às médias dessas variáveis no mesmo intervalo. O número total de observações temporais é dado por  $n$ , abrangendo os anos de 2016 a 2024. O denominador da equação normaliza a covariância pelo produto dos desvios-padrão de cada variável, garantindo que o coeficiente de correlação ( $r$ ) varie entre -1 e 1.

Os Valores positivos de  $r$  indicam uma relação direta entre EVI e precipitação, sugerindo que a vegetação responde positivamente à disponibilidade hídrica. Valores negativos indicam uma relação inversa, possivelmente associada a efeitos de seca, latência na resposta fenológica ou interferências antrópicas. A magnitude do coeficiente reflete a força da correlação, sendo que valores absolutos mais altos indicam relações mais robustas (Sun et al., 2019).

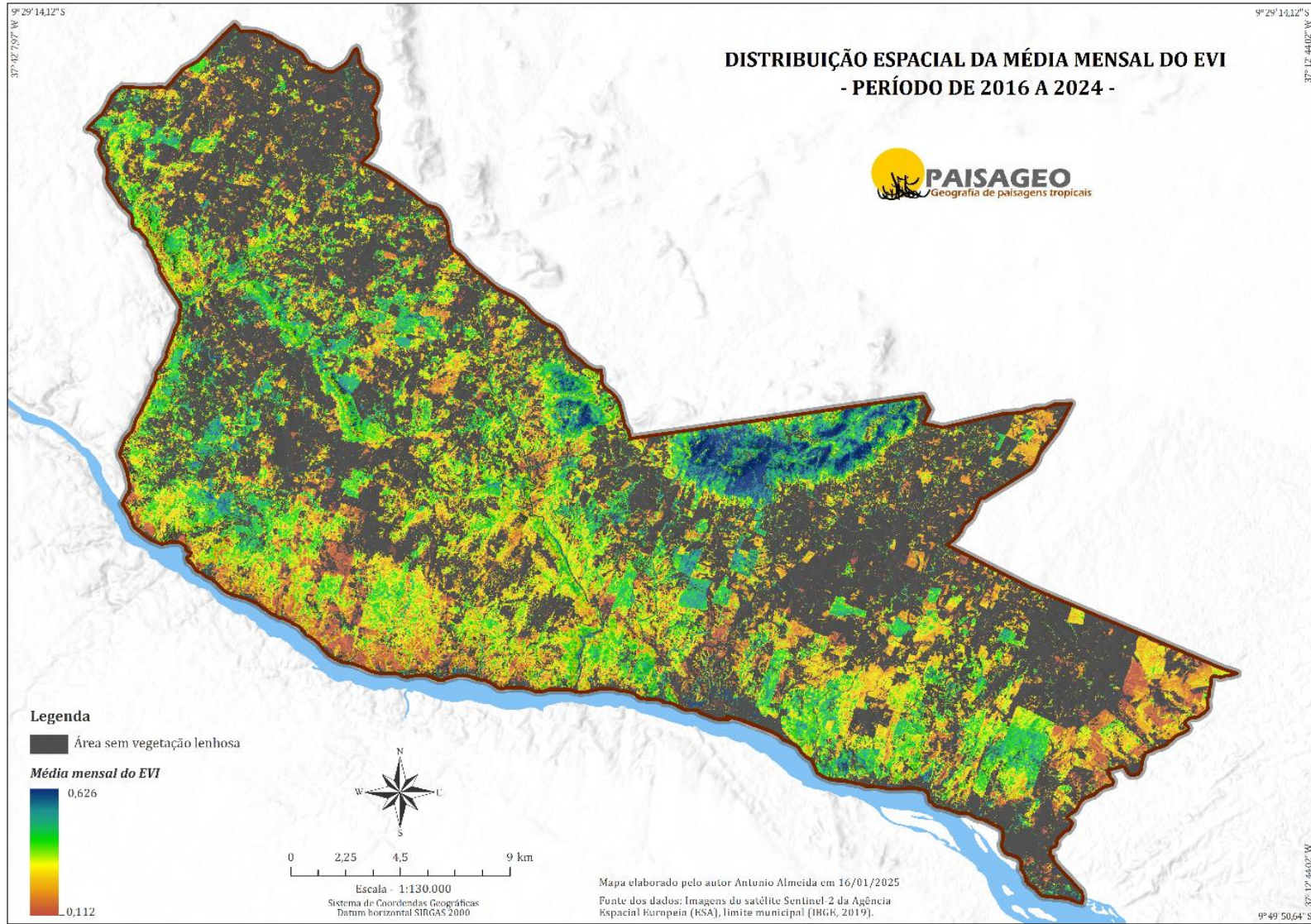
Os resultados foram organizados em mapas de correlação, permitindo a visualização espacial dos padrões de resposta da vegetação à precipitação. Embora essa abordagem forneça uma visão quantitativa da interação entre os fatores climáticos e a vegetação, é necessário

considerar limitações associadas à complexidade dos ecossistemas semiáridos, nos quais múltiplos fatores podem afetar a resposta da vegetação (Wang et al., 2022).

### 5.3 PADRÕES ESPACIAIS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

A análise espacial e temporal do EVI para a área de estudo traz evidências sobre como as perturbações antrópicas estão moldando os padrões de produtividade e alterando a dinâmica das tipologias da caatinga. Os dados refletem a hipótese central de que os impactos humanos têm um papel determinante nas alterações ecológicas da Caatinga. A **Figura 37** mostra o padrão de distribuição espacial do EVI médio entre 2016 e 2024, uma variação significativa nos valores do índice ao longo do território e fisionômicas da Caatinga, que vão de 0,026 a 0,822.

Figura 37 - Mapa de Distribuição Espacial do EVI Médio entre 2016 e 2024.



Fonte: O autor

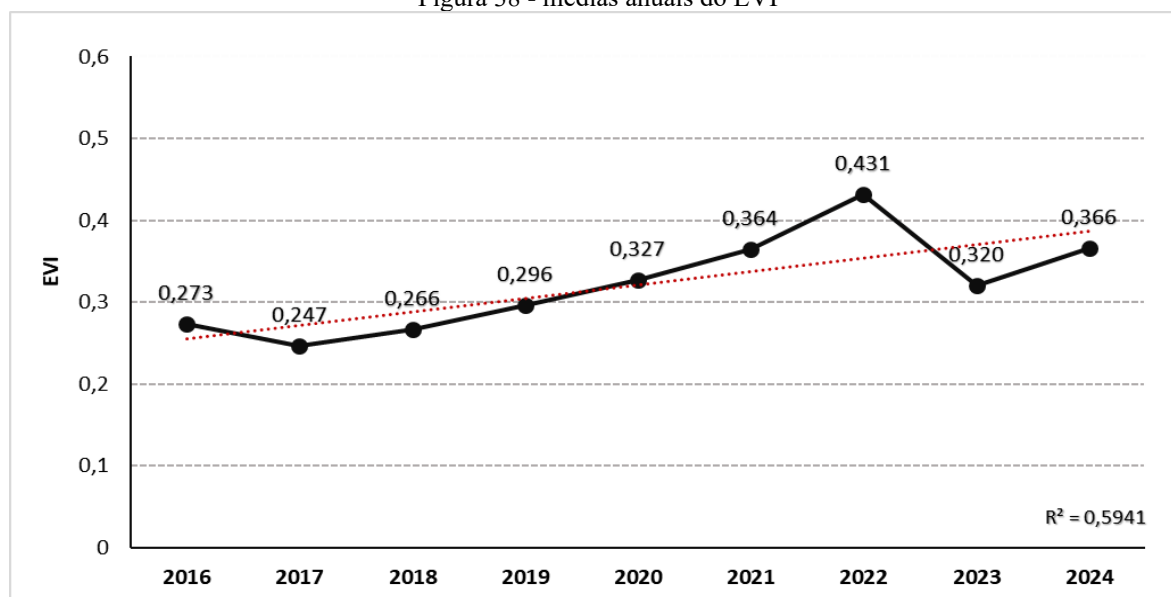
O mapa de distribuição espacial do EVI mostra claramente alta variabilidade em relação aos valores de índice na área de estudo. Predominantemente, os valores máximos de EVI estão em áreas onde a perturbação não é tão intensa pela atividade humana. Isso se deve principalmente às áreas de remanescentes de Caatinga Arbórea Densa (CAD) que têm maior biomassa e retenção de umidade e uma estrutural mais complexa, conforme evidenciado por Castanho et al. (2020). Por outro lado, áreas associadas ao EVI mais baixo são muitas vezes associadas aos arbustos abertos, como a CArA. Como mostrado por Barbosa et al. (2019) e Tomasella et al. (2018), esses tipos exibem uma desordem estrutural em seu porte e, portanto, está sob maior pressão antrópica, com menores valores de EVI, indicando menor biomassa e consequentemente maior suscetibilidade à degradação.

Outro aspecto que se pode tirar do mapa são ocorrências de fragmentação da vegetação, reveladas tanto por uma variabilidade em valores do EVI quanto por áreas de baixa conectividade ecológica. Regiões com valores baixos no valor de EVI indicam áreas onde a vegetação foi severamente suprimida ou se encontra em estado de perturbação, o que reflete na redução significativa na produtividade vegetal e na resiliência ecológica. Áreas isoladas, marcadas por reduzidos valores de EVI, tendem a ser mais vulneráveis a pressões externas, incluindo eventos climáticos extremos e intervenções humanas.

Além disso, as flutuações observadas no gráfico das médias anuais do EVI (**Figura 38**) complementam a análise ao fornecer uma visão sobre a dinâmica temporal da produtividade na Caatinga. Uma tendência de aumento constante nos valores médios do EVI durante 2016 a 2024 culminou em um pico em 2022 no valor de 0,431. Esse incremento pode ser atribuído às condições climáticas favoráveis ao crescimento, compondo esses anos de chuvas favoráveis ou possivelmente devido à regeneração em áreas previamente impactadas.

No entanto, essa recuperação não é contínua, como fica evidente na queda acentuada observada em 2023, quando o EVI cai para 0,320, o que pode ser explicado tanto a fatores climáticos, como período de seca ou alterações nos padrões de precipitação, quanto a fatores humanos, como expansão do desmatamento ou intensificação das práticas agropecuárias, que causa uma redução significativa na produtividade vegetal (Rito et al., 2017; Silva et al., 2020). O fato de a linha de tendência apresentar um aumento geral no período indica que, apesar das perturbações, há uma resposta positiva da vegetação em certos contextos, possivelmente relacionada a ciclos naturais de regeneração.

Figura 38 - médias anuais do EVI



Fonte: O autor

### 5.3.1 Padrões do EVI em diferentes tipologias e estados dinâmicos

As análises espaciais e temporais do EVI são complementadas pelos padrões observados nas diferentes tipologias da Caatinga e seus estados dinâmicos, evidenciando como as perturbações antrópicas influenciam diretamente a produtividade vegetal. A tabela dos valores médios do EVI por tipologia (**Tabela 10**) revela que as formações arbóreas, como a CAD e a CAA, apresentam os maiores valores médios de EVI, sendo 0,446 e 0,342, respectivamente.

Tabela 10 - Valores médios do EVI quanto as tipologias

Tipologias de Caatinga	Média	Mínimo	Máximo	Amplitude	Desvio Padrão
Arbustiva Aberta (ArA)	0,233	0,093	0,523	0,430	0,056
Arbórea Aberta (AA)	0,342	0,053	0,664	0,611	0,055
Arbórea Densa (AD)	0,446	0,132	0,783	0,651	0,080
Arbustiva-Arbórea Aberta (ArAA)	0,271	0,078	0,606	0,528	0,052
<b>Vegetação total da caatinga lenhosa</b>	<b>0,292</b>	<b>0,026</b>	<b>0,868</b>	<b>0,842</b>	<b>0,083</b>

Fonte: O autor

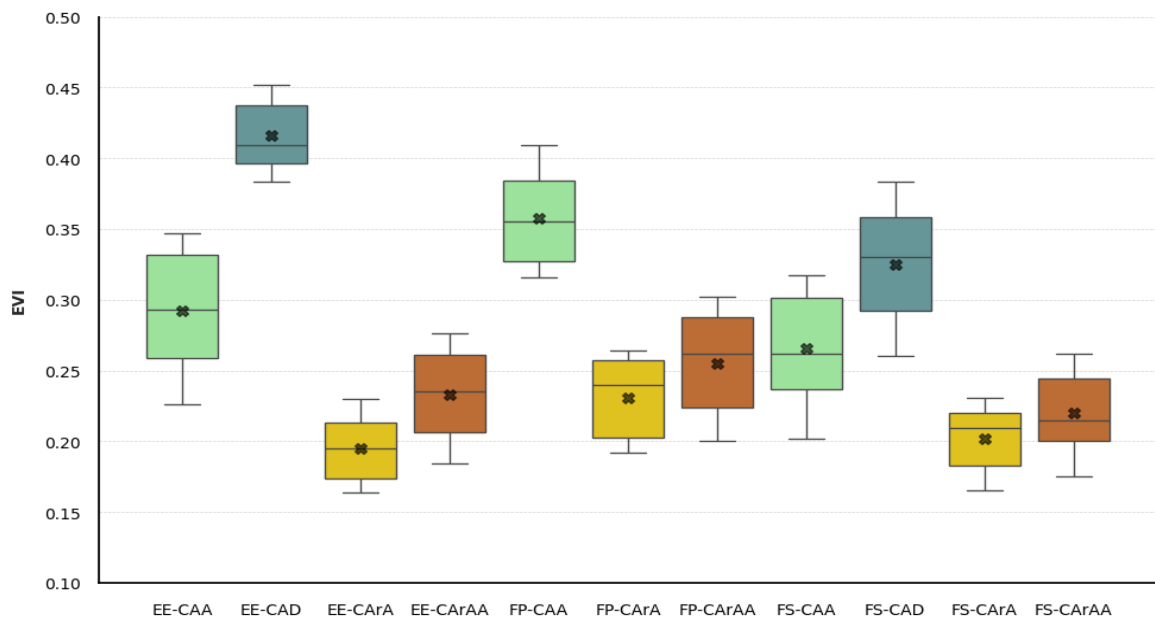
Em contrapartida, tipologias arbustivas, como a CArA, apresentam os menores valores médios de EVI (0,233), evidenciando sua vulnerabilidade a perturbações. Formações intermediárias, como a CArAA, com um EVI médio de 0,271, demonstram um potencial de

recuperação, embora ainda estejam aquém das tipologias arbóreas em termos de produtividade e resiliência.

Essa diferença mostra que essas tipologias são frequentemente associadas a áreas em estado perturbado, quando a vegetação fica muito mais exposta a forças antrópicas. Os componentes estruturais de menor densidade e complexidade tornam essas formações mais suscetíveis à alteração do uso da terra e mais difíceis na capacidade de regeneração e manutenção dos serviços ecossistêmicos (Antongiovanni et al., 2018; Marinho et al, 2016).

Esses padrões reafirmam a importância da tipologia e seus estados ao longo do tempo na análise da diversidade da Caatinga. O gráfico a seguir (**Figura 39**) ilustra como as várias tipologias da Caatinga respondem à dinâmica de estabilização, sucessão e perturbação, destacando diferenças significativas na produtividade vegetal e na resiliência ecológica entre formações arbóreas e arbustivas.

Figura 39 - Distribuição do EVI por Estados Dinâmicos e Tipologias da Caatinga



**Legenda:** CArA - Caatinga Arbustiva aberta; CAA – Caatinga Arbórea Aberta; CAD – Caatinga Arbórea Densa; CArAA – Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta; FS- Formado por Sucessão; EE – Estado Estabilizado; FP – Formado por Perturbação. Fonte: O autor

A análise dos valores permite identificar padrões claros que refletem os impactos das perturbações antrópicas e dos processos ecológicos em cada tipologia. Nas áreas do Estado Estabilizado, os valores de EVI são consistentemente mais altos, maior produtividade vegetal e resiliência. Neste contexto, as tipologias arbóreas como o CAD apresentam cerca de 0,40 EVI médio, com intervalo em torno de 0,35 a 0,45, proporcionando alta estabilidade e produtividade,

enquanto o CAA registra valores em torno de 0,35. Em contraste, a CArA apresenta menores valores em torno de 0,20 e intervalo mais estreito entre 0,15 e 0,25, refletindo uma vegetação mais dinâmica e limitada, proporcionando uma menor resiliência de suportar distúrbios e manter altos níveis de produtividade.

Em áreas formadas por perturbação, os impactos negativos das atividades humanas são claramente perceptíveis, com uma queda drástica nos valores de EVI em todas as tipologias. O CAA, em média, tende a ter um valor de EVI próximo de 0,25, enquanto o CArAA se aproxima de um valor de cerca de 0,22. Quanto às tipologias puramente arbustivas, como o CArA, os números médios de EVI são os mais baixos, em torno de 0,20, refletindo sua maior vulnerabilidade a perturbações e menor capacidade de regeneração. Isso indica que, na verdade, as áreas perturbadas enfrentam dificuldades de recuperação ecológica, demonstrando um processo de substituição gradual de formações vegetacionais mais complexas por tipologias arbustivas mais simplificadas.

As áreas formadas por sucessão apresentam valores médios intermediários de EVI, diminuindo um processo de recuperação parcial da vegetação. As formações florestais continuam a mostrar vantagem neste contexto, com CAD registrando valores médios em torno de 0,35 e CAA tendo EVI médio próximo de 0,30, com variação de 0,25 a 0,35, mostrando seu potencial de regeneração. Por outro lado, tipos arbustivos como CArA ainda apresentam valores médios em torno de 0,18, variando de 0,15 a 0,22, refletindo maior dificuldade de recuperação da produtividade após eventos de perturbação. Já o CArAA, com valores próximos a 0,22, indica um potencial de regeneração superior ao das formações arbustivas puras, embora ainda inferior ao das formações arbóreas.

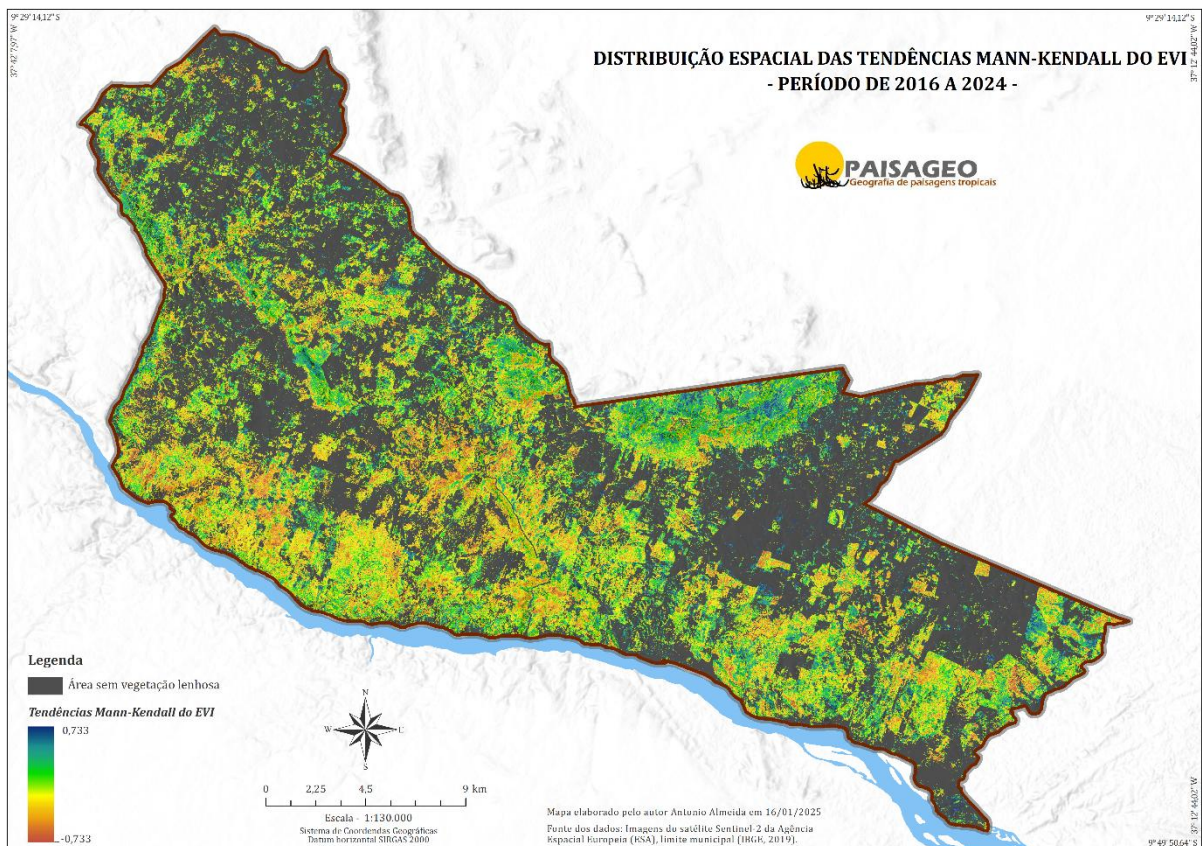
Ao observar os valores, fica claro que tipologias arbóreas, como CAD e CAA, apresentam maior resiliência e tendem a manter valores de EVI mais altos mesmo em contextos perturbados ou sucessionais. Em contraste, tipologias arbustivas fornecem valores continuamente mais baixos, apontando para sua natureza altamente vulnerável às mudanças no uso da terra. A diferença captura a dinâmica de perturbações antropogênicas, afetando fortemente as formações menos estruturadas que diminuem a capacidade de recuperação desses ecossistemas (Marinho et al., 2016).

#### 5.4 TENDÊNCIAS E VARIAÇÕES DO EVI NA VEGETAÇÃO

As tendências interanuais da média do EVI de 2016 a 2024, ilustram dinâmicas muito importantes sobre a cobertura vegetal da Caatinga. Tais dinâmicas são sinais de processos diferenciados, de regeneração e degradação. Variações que nos permitem ver como as tipologias arbóreas e arbustivas estão respondendo à pressão antrópica e à dinâmica ambiental, e assim, interpretar as tendências de esverdeamento (aumento do EVI) e escurecimento (diminuição do EVI) na caatinga ao longo do tempo.

Baseando-se na estatística do teste de Mann-Kendall, que mede a tendência não linear monotônica dos valores de EVI. A **Figura 40** revela que 74,70% do território mostram tendências negativas, quase inteiramente áreas arbustivas, variando de 0 a -0,867, indicando desflorestamento, práticas inadequadas de manejo da terra, expansão de atividades agropecuárias. Em contrapartida, 25,30% do território mostram tendência positiva variando de 0 a 0,733, indicando aumento de valores de EVI em áreas predominantemente arbóreas.

Figura 40 - Distribuição espacial das tendencias Mann-Kendall do EVI



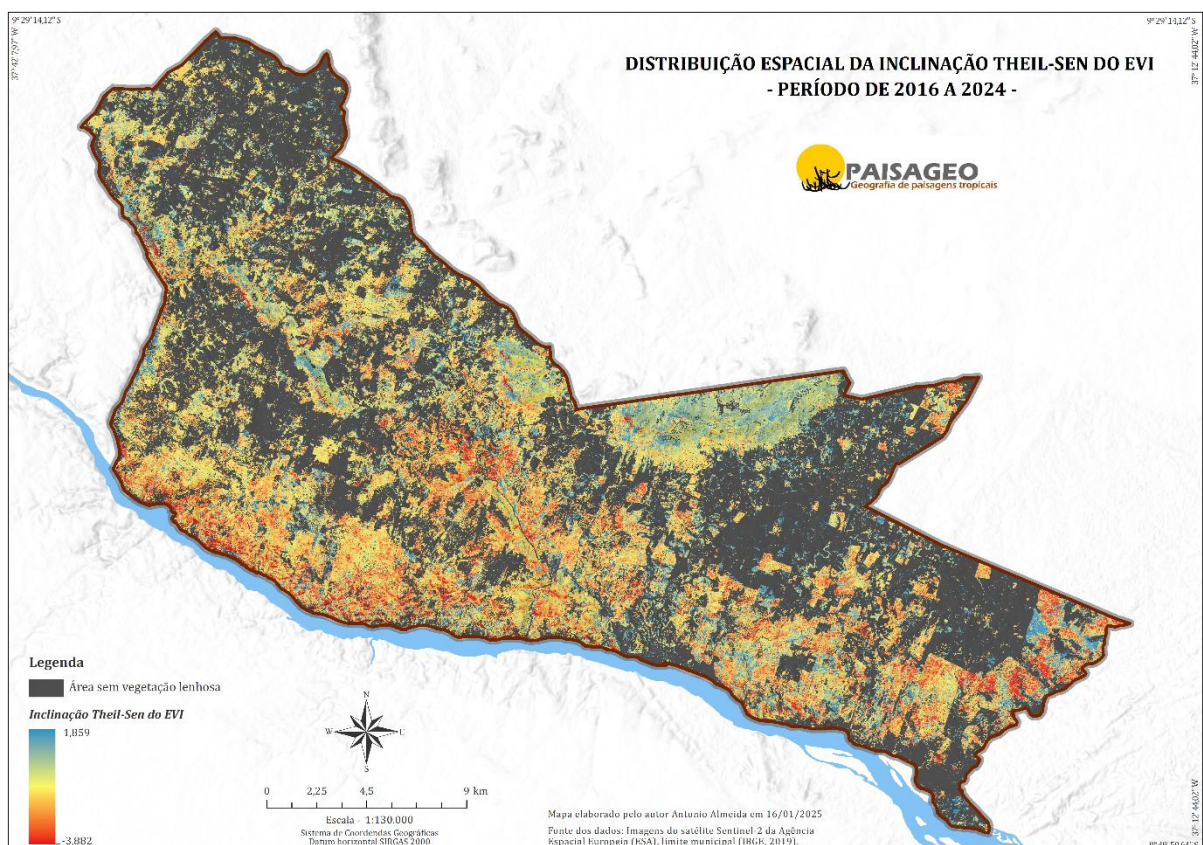
Fonte: O autor



O aumento no valor de EVI, como evidenciado no mapa, pode ser interpretado como resultado de processos de regeneração natural e sucessão ecológica, além de possíveis reduções nas pressões antrópicas que favoreceram à recuperação da vegetação

A estimativa da inclinação de Theil-Sen (**Figura 41**) reforça a análise ao medir a taxa de mudança anual no EVI. As áreas com inclinações positivas (0 a 1,859) indicam um aumento na produtividade vegetal, particularmente em regiões dominadas por tipologias arbóreas densas e estáveis. Esse padrão está associado a processos de sucessão ecológica e à acumulação de biomassa. Por outro lado, as inclinações negativas (0 a -3,882) estão concentradas em áreas de tipologias arbustivas, refletindo um declínio acelerado da vegetação, diretamente relacionado à intensificação das atividades humanas. A inclinação média de -0,083 confirma que, no período analisado, o escurecimento é o processo predominante na área de estudo, afetando principalmente as regiões com menor conectividade ecológica e maiores pressões antrópicas.

Figura 41 - Distribuição espacial da estimativa da inclinação Theil-Sen

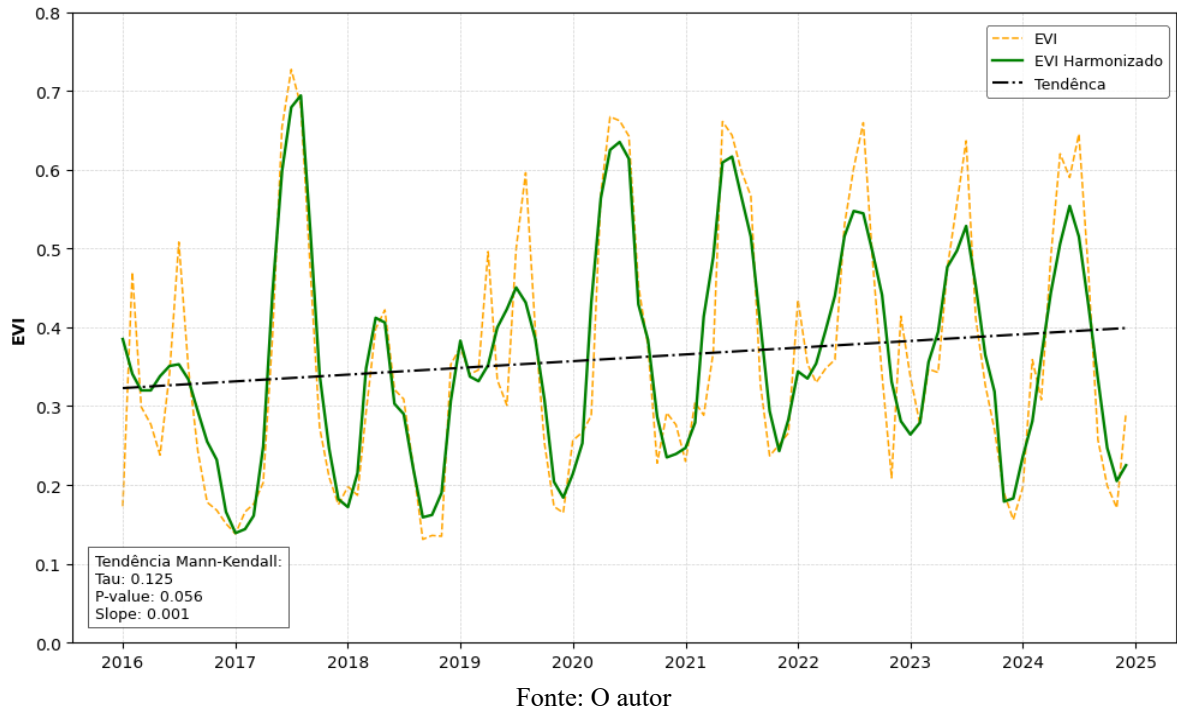


Fonte: O autor

Essas tendências são corroboradas pela **Figura 42**, que apresenta a modelagem da tendência linear aplicada a diferentes combinações de início e término da série temporal do

EVI. Essa análise evidencia a influência do comprimento da série temporal na força das tendências observadas.

Figura 42 - Tendência da série temporal do EVI da caatinga lenhosa da área de estudo



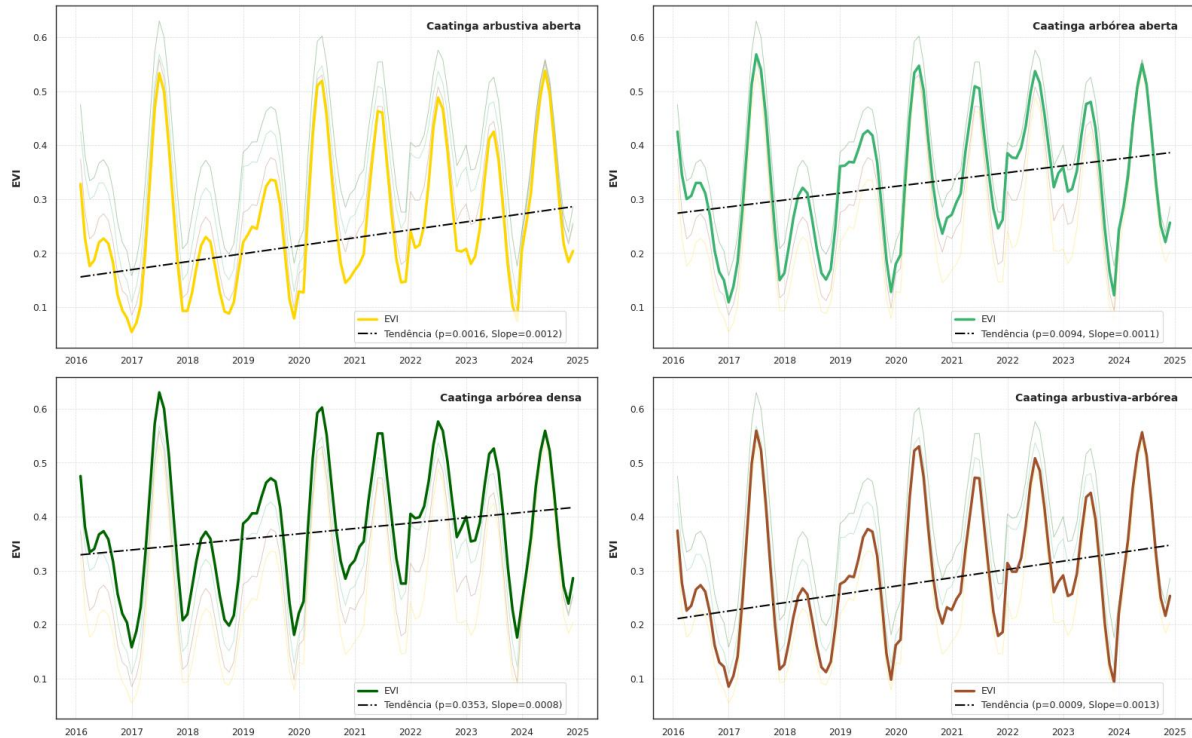
A inclinação levemente positiva da tendência linear ( $\text{Tau} = 0,154$ ;  $p\text{-valor} = 0,027$ ) reflete um padrão de sazonalidade, no qual os ciclos observados no gráfico evidenciam a forte dependência da vegetação da Caatinga em relação à disponibilidade hídrica, com os picos de EVI coincidindo com os períodos de maior precipitação. Essa sazonalidade, porém, é mais estável em áreas arbóreas, enquanto em áreas arbustivas observa-se maior oscilação, evidenciando sua menor resiliência estrutural e maior exposição às pressões antrópicas (**Figura 43**).

Em geral, as tipologias arbóreas são destaques no que concerne a maiores valores médios de EVI, com médias de 0,3 a 0,5 em CAA e 0,4 a 0,6 em CAD, reafirmando a concepção de maior produtividade e complexidade estrutural. Além disso, essas tipologias são mais estáveis em tendências temporais, pois ambas apresentam declives positivos iguais a 0,0012, o que apresenta uma percepção maior de resiliência e recuperação.

Em relação às tipologias arbustivas, as médias foram menores, isto é, 0,2 a 0,3 em CArA e 0,25 a 0,4 em CArAA, indicando que possuem menos biomassa e são mais impactáveis mediante pressões ambientais ou antrópicas. Esta última ainda apresenta tendência anuais de EVI mais nítidas, refletindo maior dependência de condições climáticas favoráveis. No entanto,

as tendências lineares positivas observadas, com inclinação de 0,0011 para o CArA e 0,0012 para o CArAA, indicam a ocorrência de possíveis processos de sucessão ecológica e regeneração da vegetação ao longo do tempo.

Figura 43 - Tendência da série temporal do EVI da caatinga lenhosa das tipologias da área de estudo



Fonte: O autor

#### 5.4.1 Análise conjunta das tendências em diferentes tipologias e estados dinâmicos

A análise das tipologias de vegetação da Caatinga, com base nos resultados do teste de Mann-Kendall e nas estimativas de inclinação de Theil-Sen, revela padrões significativos nos estados dinâmicos das formações vegetais, evidenciando processos de degradação, resiliência e recuperação. O EVI, como indicador de saúde e produtividade da vegetação (Fadl et al., 2024; Kurrel et al., 2022), permite identificar tendências que refletem mudanças estruturais e funcionais nas tipologias. A **Tabela 11** sintetiza essas dinâmicas, destacando as diferenças entre tipologias arbóreas e arbustivas, suas respostas às pressões antrópicas e os potenciais de regeneração ecológica.

Tabela 11 - Estimativas Mann-Kendall e da inclinação de Theil-Sem das tipologias

Tipologias	Estados Dinâmicos	Tau De Mann-Kendall	Theil-Sen Slope
<i>CAA</i>	Formado por Sucessão	-0,302	-0,587
	Estado Estabilizado	-0,333	-0,664
<i>CAD</i>	Formado por Perturbação	-0,145	-0,248
	Formado por Sucessão	-0,255	-0,461
<i>CArA</i>	Estado Estabilizado	-0,048	-0,048
	Formado por Sucessão	-0,021	0,144
	Formado por Perturbação	-0,136	-0,230
<i>CArAA</i>	Estado Estabilizado	0,003	0,160
	Formado por Sucessão	-0,135	-0,184
	Formado por Perturbação	-0,263	-0,525
	Estado Estabilizado	-0,208	-0,394

Fonte: O autor

Na Caatinga Arbórea Aberta (CAA), os processos de sucessão e estabilização mostram tendências negativas significativas, conforme os resultados dos testes de Mann-Kendall e das inclinações de Theil-Sen. O Tau de -0,302 e a inclinação de -0,587 para a sucessão indicam que a capacidade regenerativa dessa tipologia está comprometida. Esses dados sugerem que perturbações constantes, como desmatamento e manejo inadequado, podem interromper os processos de recuperação, levando à transição da CAA para estados mais instáveis ou até para formações arbustivas. A estabilização, com Tau de -0,333 e inclinação de -0,664, reforça que a tipologia está cada vez mais vulnerável à fragmentação do habitat e à degradação causada por atividades humanas, o que pode resultar na regressão para estágios sucessionais iniciais.

Na Caatinga Arbórea Densa (CAD), as tendências também refletem os impactos das variações climáticas e antrópicas. Os estados formados por sucessão apresentam um Tau de -0,255 e inclinação de -0,461, indicando dificuldades em manter a estabilidade, especialmente sob uso intensivo dos recursos naturais. Esse padrão sugere que, sob perturbações prolongadas, a CAD pode regredir para formações menos densas, como a CAA, ou até para tipologias arbustivas, caso as pressões ambientais não sejam controladas. Por outro lado, em estado estabilizado, CAD apresenta um Tau de -0,048 e inclinação de -0,048, sugerindo um equilíbrio frágil. Esse equilíbrio pode ser mantido em condições favoráveis, mas está suscetível a degradação caso haja intensificação das atividades humanas.

Na Caatinga Arbustiva Aberta (CArA), os dados revelam uma interação entre fatores climáticos e processos ecológicos. A leve tendência positiva para o estado estabilizado (Tau de 0,003 e inclinação de 0,160) sugere que, sob condições favoráveis e com menor pressão

antrópica, essa tipologia pode alcançar maior estabilidade. No entanto, estado formado por perturbação apresenta Tau de -0,136 e inclinação de -0,230, refletindo o impacto de processos regressivos relacionados à transição de formações arbóreas. Além disso, estados formados por sucessão apresentam uma tendência de estagnação, com Tau de -0,021 e inclinação de 0,144, indicando que a CArA enfrenta dificuldades para avançar nos processos de regeneração devido a distúrbios constantes.

A situação é mais preocupante na Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta (CArAA). Os dados de sucessão (Tau de -0,135 e inclinação de -0,184) indicam grandes dificuldades para avançar nos processos sucessionais, devido à intensa pressão antrópica, como extração de madeira e sobrepastoreio. O estado por perturbação, com Tau de -0,263 e inclinação de -0,525, evidencia uma alta vulnerabilidade dessa tipologia a mudanças climáticas e impactos humanos. O estado estabilizado, com Tau de -0,208 e inclinação de -0,394, indica que a CArAA está cada vez mais distante de alcançar um estado estável, reforçando a necessidade urgente de intervenções de manejo para mitigar os impactos e promover a recuperação ecológica.

As tendências gerais na análise de Mann-Kendall indicam que as perturbações antropogênicas estão exercendo uma pressão contínua sobre as tipologias da Caatinga, particularmente nos estados mais perturbados, como CAA e CAD, onde a sucessão e estabilização são mais afetadas. A magnitude das inclinações negativas de Theil-Sen enfatiza ainda mais a degradação ocorrente nesses sistemas, especialmente nas tipologias como CAA e CArAA, onde as taxas de declínio no EVI são mais acentuadas em todos os estados dinâmicos.

Como desdobramento prático desta análise, os resultados obtidos por meio do EVI e dos testes de tendência foram incorporados a uma aplicação interativa desenvolvida no ambiente Google Earth Engine (GEE). Essa plataforma, apresentada no **Aplicativo D.2, disponível no Apêndice D**, permite o monitoramento contínuo das áreas com perda ou ganho de vigor vegetativo, ampliando o potencial de replicação e aplicação da metodologia em outras regiões semiáridas.

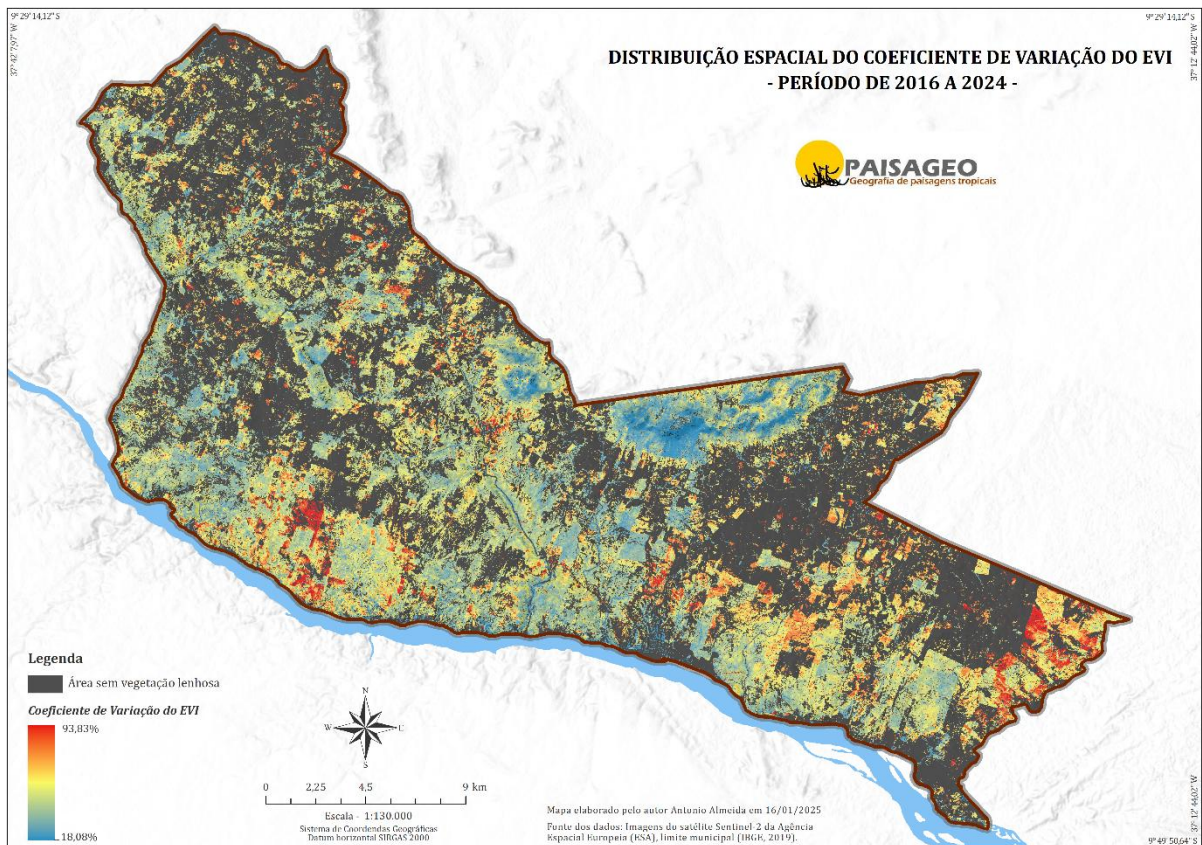
## 5.5 VARIABILIDADE DAS MUDANÇAS DO EVI

O coeficiente de variação (CV) é uma métrica poderosa para caracterizar a dispersão e volatilidade do EVI em séries temporais, refletindo o grau em que a quantidade de vegetação flutua espacial e temporalmente. Também conhecido como taxa de desvio padrão, o CV é calculado para indicar o grau relativo de dispersão produzido em distribuições espacial e

temporalmente dentro de fenômenos geográficos (Jiang et al., 2015). Quanto maior o CV, maior a dispersão dos dados, o que sugere maior variação na vegetação ao longo do tempo. Esse comportamento é especialmente útil para identificar mudanças e flutuações na vegetação que podem estar relacionadas a perturbações ambientais, como o impacto de atividades humanas (Milich; Weiss, 2000; Alavi; King, 2020).

A análise da variação espacial do EVI entre 2016 e 2024, representada na **Figura 44**, fornece detalhes fundamentais sobre a estabilidade temporal da vegetação na Caatinga, destacando diferenças significativas nas dinâmicas das suas tipologias. Expresso em porcentagem, o CV permitiu identificar áreas com maior ou menor estabilidade na produtividade vegetal ao longo do tempo.

Figura 44 - Distribuição espacial do Coeficiente de Variação do EVI



Fonte: O autor

Áreas com alto CV, com valores chegando a 93,83%, indicam alta instabilidade temporal no EVI. Tais áreas geralmente se associam a tipos mais vulneráveis como o CARa e o CARAA. Para tais formações, a vegetação tende a ser mais suscetível a flutuações sazonais principalmente por ser fortemente dependente de condições climáticas favoráveis como chuvas para sustentar a produtividade. Além disso, essas áreas correspondem àquelas expostas a maior

pressão humana, agravando os ciclos de degradação e dificulta a recuperação natural da vegetação.

No entanto, regiões com CV baixo em torno de 18,08% apresentam maior estabilidade em termos de produtividade vegetal. Essas áreas são predominantemente associadas aos tipos de árvores mais densas, como CAD, que têm alta biomassa e complexidade estrutural. Nesse caso, a maior resiliência estrutural dessas áreas confere a elas uma capacidade superior de suportar as variações sazonais do clima, mantendo a produtividade mesmo em períodos adversos, além de oferecer maior resistência às pressões antrópicas.

O padrão espacial observado no mapa evidencia que as áreas de maior instabilidade estão frequentemente localizadas em zonas de transição, como bordas de fragmentos florestais e regiões com intensa atividade humana, enquanto as áreas de maior estabilidade estão associadas a remanescentes de catinga arbórea, sobretudo em áreas protegidas ou de difícil acesso.

### 5.5.1 Análise do CV em diferentes tipologias e estados dinâmicos

A análise CV das diferentes tipologias da Caatinga e estados dinâmicos da Caatinga, por meio da **Tabela 12**, permiti compreender como a vegetação responde às perturbações antropogênicas e condições ambientais ao longo do tempo.

Tabela 12 - Estimativas dos coeficientes de variação das tipologias da caatinga da área de estudo

Tipologias	Estados Dinâmicos	Coeficiente De Variação	Médias Das Tipologias
CAA	Formado por Sucessão	58,23 %	53,46 %
	Estado Estabilizado	53,46 %	
	Formado por Perturbação	48,91 %	
CAD	Formado por Sucessão	50,40 %	47,35 %
	Estado Estabilizado	44,30 %	
CARA	Formado por Sucessão	65,07 %	65,78 %
	Formado por Perturbação	62,56 %	
	Estado Estabilizado	69,72 %	
CARAA	Formado por Sucessão	64,29 %	62,01 %
	Formado por Perturbação	58,51 %	
	Estado Estabilizado	63,23 %	

Fonte: O autor

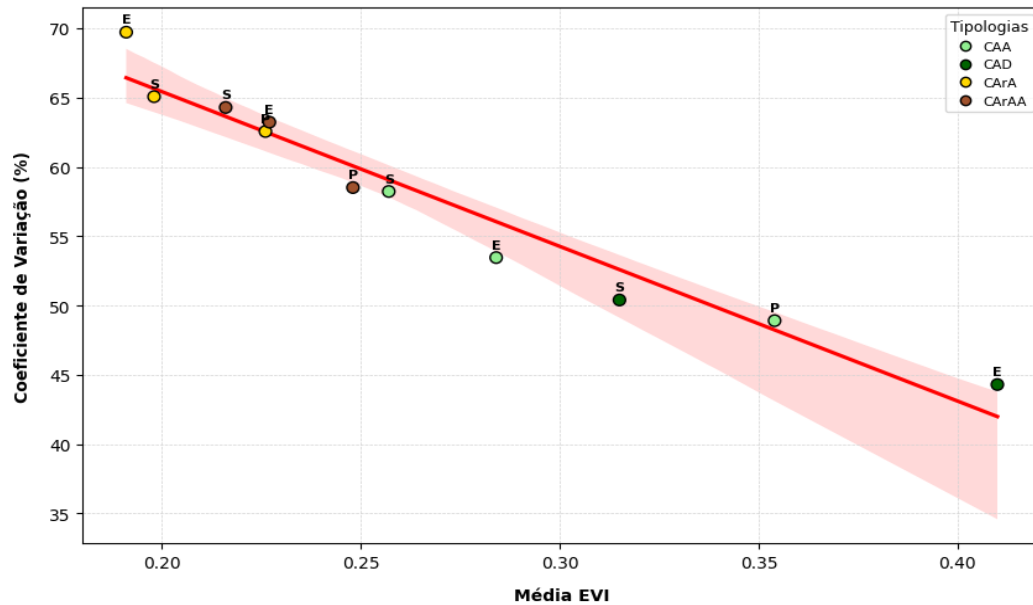
As tipologias de porte arbóreo apresentaram CV significativamente mais baixos em todos os estados dinâmicos, evidenciando maior estabilidade temporal e resiliência. A média do CV da CAA é de 53,46%, com os estados formados por sucessão, perturbação e estados estabilizados apresentando 58,23%, 48,91% e 53,46%, respectivamente. Já na CAD, o CV médio é de 47,35%, o menor entre todas as tipologias, sendo observado 50,40% para formado em sucessão e 44,30% para estado estabilizado, destacando a alta capacidade dessas formações de amortecer flutuações sazonais e resistir a pressões antrópicas.

Em contrapartida, as tipologias de porte arbustivo exibem os maiores coeficientes de variação, refletindo alta instabilidade temporal. A média do CV da CARA é de 65,78%, sendo o estado estabilizado o mais instável, com 69,72%, seguido pelos estados formados por sucessão (65,07%) e perturbação (62,56%). Na CArAA, o CV médio é de 62,01%, com os valores para sucessão, estabilização e perturbação sendo 64,29%, 63,23% e 58,51%, respectivamente. Os valores indicam que as tipologias arbustivas são menos tolerantes às variações climáticas e às pressões antrópicas, o que reflete sua alta dependência das condições desenvolvidas para apoiar a produtividade e, conseqüentemente, de sua vulnerabilidade ecológica.

Para investigar a relação entre os valores EVI médios e o coeficiente de variação em diferentes tipologias da Caatinga, foi realizado um gráfico de dispersão da sequência temporal deles (**Figura 45**). Constatou-se, pelos resultados apresentados, que o coeficiente de determinação é muito alto,  $R^2 = 0,95$ , ou seja, a relação entre ambas as variáveis é muito forte e negativa, o que implica dizer que com o aumento de valores médios de EVI, o coeficiente de variação diminui significativamente. Tal enunciado confere com as achadas de Antongiovanni et al. (2020) e Henrique (2020), segundo as quais sugerem que as formas vegetativas mais produtivas são temporalmente estáveis, enquanto as menos produtivas são bastante flutuantes em relação aos seus estados dinâmicos.



Figura 45 - relação entre os valores EVI médios e o coeficiente de variação em diferentes tipologias



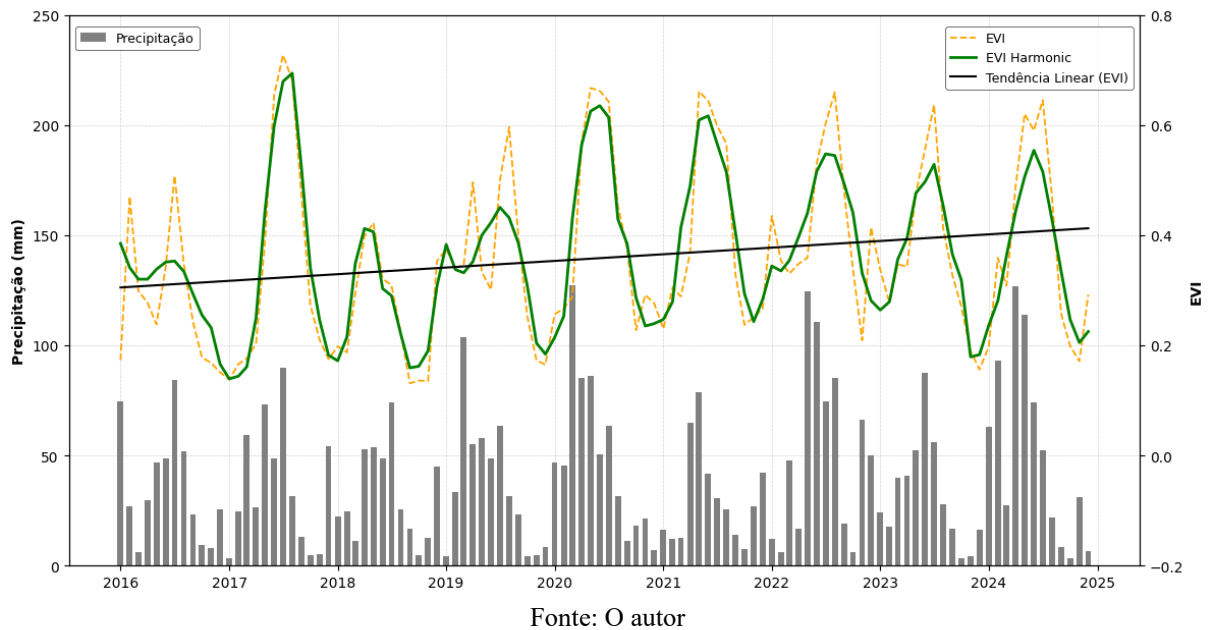
Legenda: As letras indicam os estados dinâmicos da vegetação: S - Formado por Sucessão, E - Estado Estabilizado, e P - Formado por Perturbação. Fonte: O autor

O gráfico reforça que as tipologias arbóreas (CAA e CAD) possuem maior capacidade de manter a estabilidade temporal da vegetação, enquanto as tipologias arbustivas (CArA e CArAA) apresentam maior instabilidade, refletindo sua vulnerabilidade às condições ambientais e antropogênicas. A relação negativa entre EVI e CV reflete a transição ecológica entre os estados dinâmicos: áreas com maior EVI tendem a ser mais estáveis (menor CV), enquanto áreas com menor EVI estão mais sujeitas à variação (maior CV), especialmente nas tipologias de porte arbustivo.

## 5.6 RESPOSTA ESPACIAL DO EVI AOS FATORES CLIMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO

A análise temporal fornecida no gráfico (**Figura 46**) reflete uma forte relação entre a precipitação acumulada mensal e o EVI na dinâmica da vegetação da Caatinga entre os anos de 2016 e 2024. Como principal fator limitante para o crescimento vegetativo em ambientes semiáridos tropicais, a precipitação está condicionando diretamente a produtividade da vegetação (Erasmí et al., 2014). O gráfico indica que os picos de precipitação são acompanhados por aumentos significativos no EVI, enquanto os períodos de seca levam a uma queda acentuada nos valores do índice, caracterizando assim o padrão sazonal típico da vegetação neste bioma.

Figura 46 - Relação temporal entre EVI e precipitação de 2016 a 2024.



Dentre todos os anos analisados, o ano de 2020 foi classificado como o ano em que as chuvas mais chegaram ao pico, sendo que vários meses foram acima da marca de 200 mm, o que fizeram aumentar o EVI, chegando a valores próximos a 0,7. Isso quer dizer que a vegetação pode responder de forma rápida ao aumento da disponibilidade de água, aumentando a biomassa verde. Também semelhantemente, o ano de 2021 sustentou um alto índice de incidentes, o que se refletiu no EVI harmoniosamente alto, embora não tanto como em 2020. Por outro lado, anos como 2018 e 2023 tiveram poucas precipitações, com muitos meses figurando médias que não superavam os 100 mm. E isso foi seguido por uma redução significativa no EVI durante as estações secas, abrangendo, aproximadamente, 0,2 a 0,3.

Além disso, a resposta da vegetação à precipitação mostra um atraso no padrão fenológico. Geralmente, o EVI atinge o pico em torno de um ou dois meses após a ocorrência da maioria dos eventos de precipitação. Esse comportamento é observado em 2019, onde as maiores precipitações ocorreriam em abril e maio, após o que um máximo de EVI seria registrado em junho ou julho. O atraso reflete o tempo necessário para a vegetação capturar e utilizar a água disponível, levando ao crescimento e ao acúmulo de biomassa.

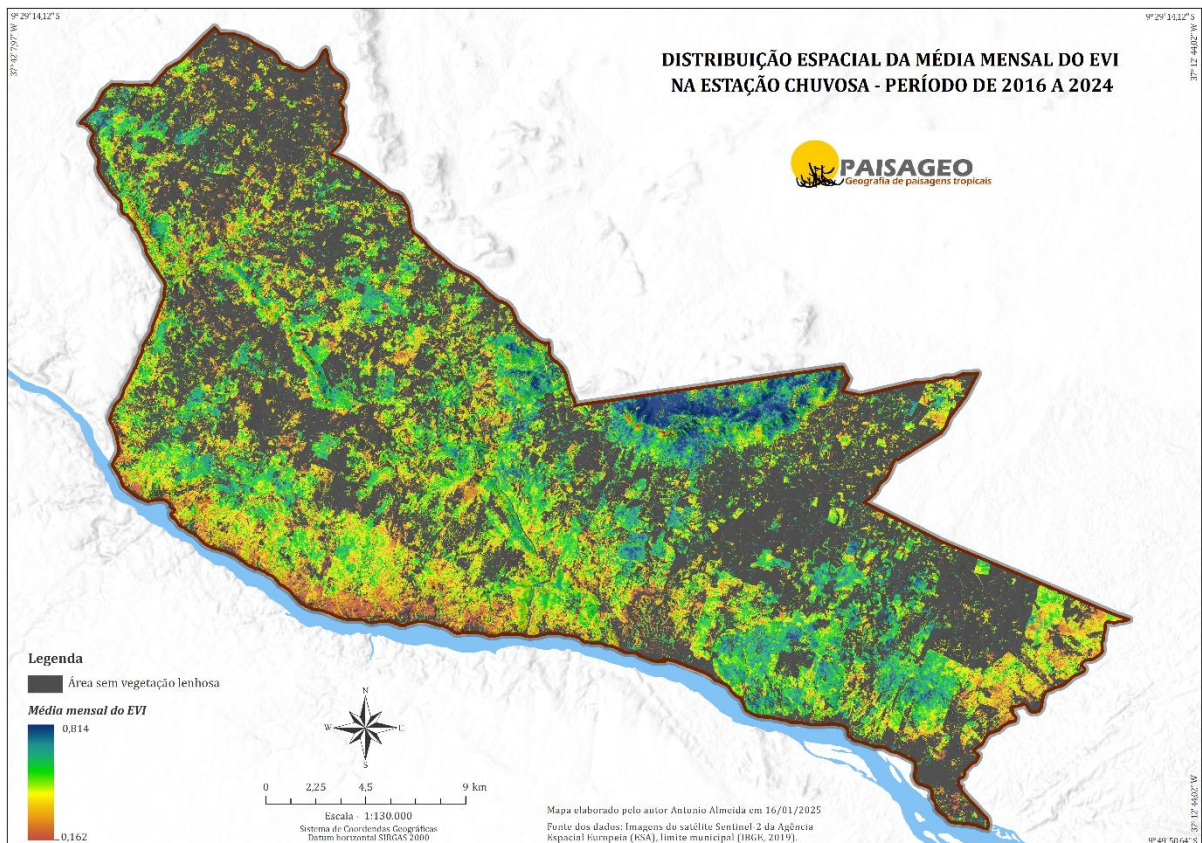
O gráfico também destaca uma tendência linear crescente no EVI ao longo do período analisado, o que sugere uma recuperação modesta da vegetação em determinadas áreas. Entretanto, a recuperação não é uniforme, sendo mais evidente em anos de maior precipitação, como 2020, e limitada em anos com chuvas menos expressivas, como 2016 e 2021.

Os padrões interanuais capturados reforçam a alta dependência da vegetação da Caatinga ao regime hídrico. Nos meses chuvosos o EVI aumenta significativamente, evidenciando o papel crucial da precipitação na dinâmica fenológica e na recuperação da vegetação. Por outro lado, nos meses secos o índice apresenta valores muito reduzidos, refletindo a entrada da vegetação em dormência diante da escassez hídrica.

Esse comportamento fica evidente quando comparamos Distribuição Espacial do EVI nas Estação chuvosa (**Figura 47**) e nos Estação Seca (**Figura 48**), referentes ao período de 2016 a 2024, observando-se dinâmicas sazonais distintas moldadas pela variabilidade hídrica.

Os meses chuvosos mostram uma concentração notável de áreas com altos valores de EVI geralmente encontrados entre 0,6 e 0,8. Esse padrão reflete o aumento vigoroso da atividade vegetativa, especialmente entre tipologias mais densas como a CAD, que obtém o máximo benefício do suprimento de água, maximizando subsequentemente sua produção de biomassa. No entanto, áreas com locais com vegetação mais esparsa, como CArA, com uma faixa menor de valores entre 0,2 e 0,4, mesmo em períodos úmidos, podem indicar limitações extras, como distúrbios antropogênicos ou solos de fertilidade mais baixa.

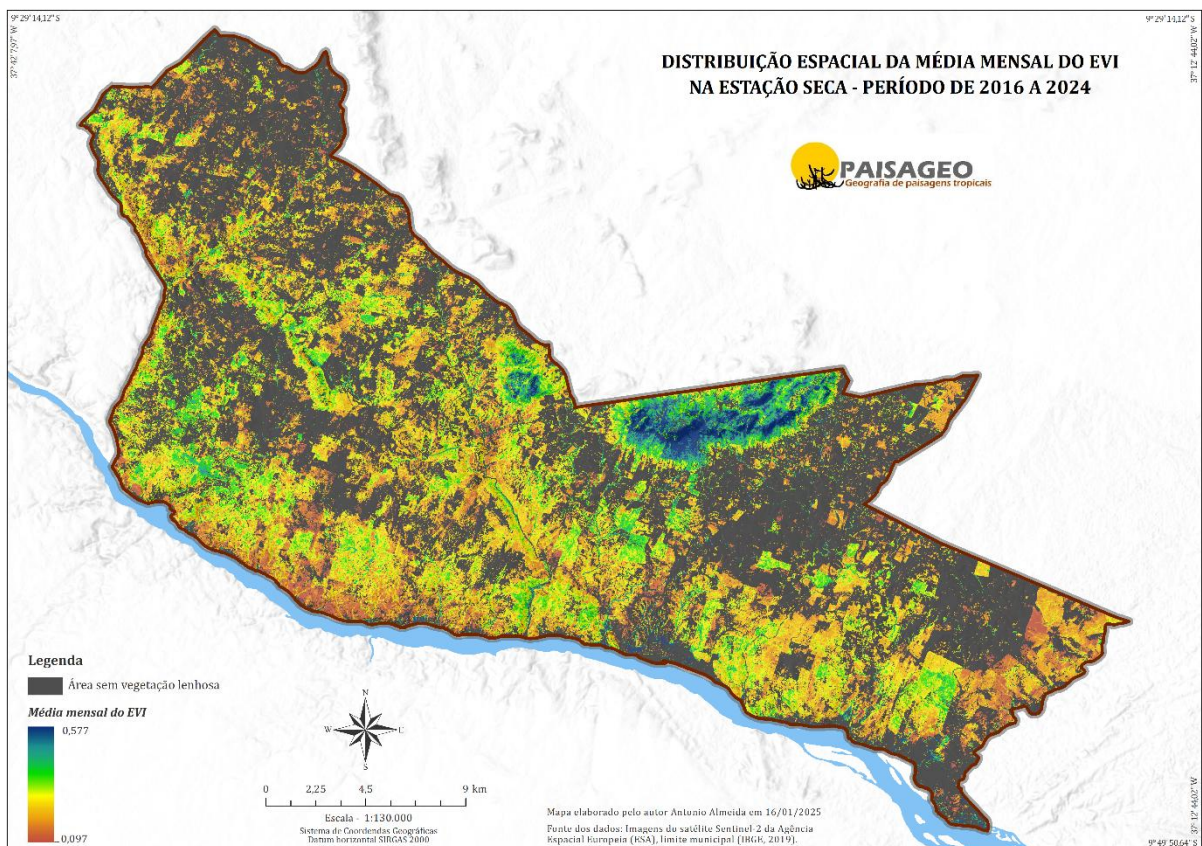
Figura 47 - Distribuição Espacial do EVI na Estação chuvosa



Fonte: O autor

A resposta vegetativa durante os meses secos altera drasticamente, por um declínio acentuado nos valores de EVI em toda a área. A maioria das áreas apresentam com valores em torno de 0,1 a 0,3, demonstrando dormência devido à falta de suprimento de umidade. As regiões associadas às tipologias mais densas, como a CAD, têm uma redução mais acentuada no EVI, variando de 0,3 a 0,5, indicando maior dependência de água por essas tipologias. Ao contrário, áreas vegetativas mais abertas como CARa e CARAA mostram variações espaciais mais uniformemente distribuídas com valores de EVI geralmente abaixo de 0,2.

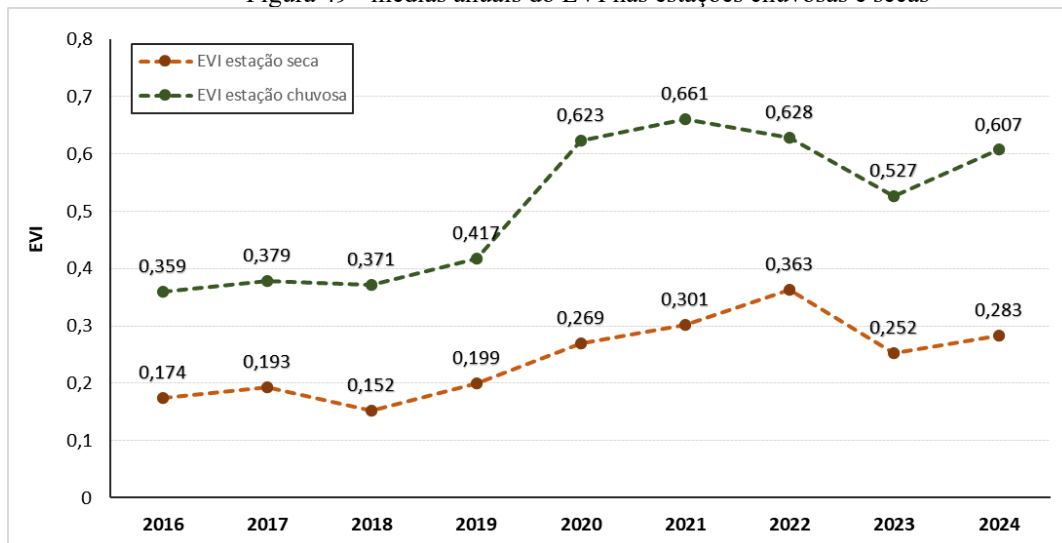
Figura 48 - Distribuição Espacial do EVI na Estação Seca



Fonte: O autor

Comparando os dois períodos, nota-se uma amplitude de variação mais acentuada nos valores de EVI em tipologias arbóreas densas, o que reforça sua sensibilidade às mudanças sazonais. Em contrapartida, as tipologias mais abertas apresentam menor amplitude, mas não deixam de ser afetadas. A persistência de áreas com valores baixos de EVI em ambos os períodos, sugere a presença de fatores limitantes adicionais, como uso intensivo do solo e desmatamento. Esta variação dos valores do EVI fica claro quando comparamos as médias anuais do EVI nas estações chuvosas e secas (**Figura 49**).

Figura 49 - médias anuais do EVI nas estações chuvosas e secas



Fonte: O autor

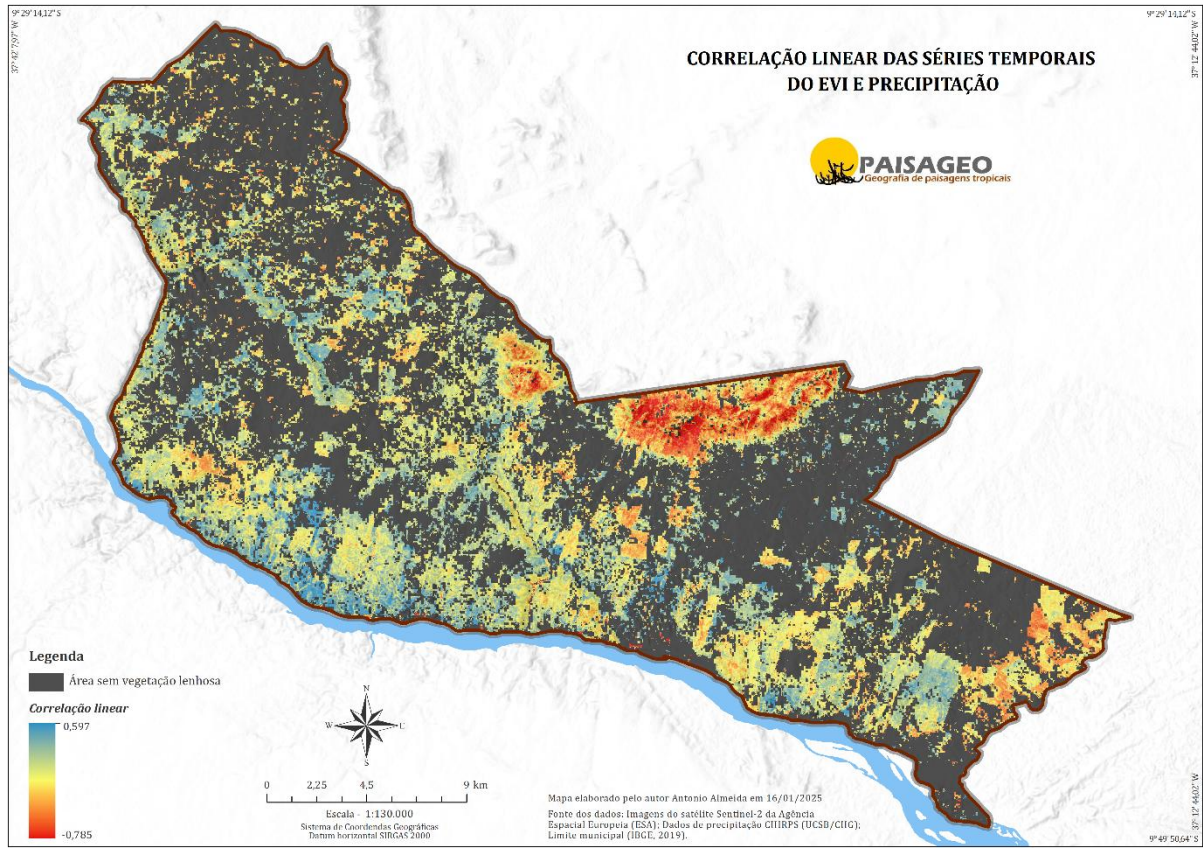
Os dados permitem evidenciar a sensibilidade da vegetação da Caatinga às variações hídricas, além de sua vulnerabilidade às perturbações humanas, que podem comprometer sua capacidade de regeneração nos períodos de maior estiagem.

### 5.6.1 Correlação linear do EVI e a precipitação

O mapa de correlação linear entre o EVI e a precipitação para o período de 2016 a 2024 revela padrões espaciais distintos que refletem as diferenças de resposta das tipologias vegetais à variabilidade hídrica (**Figura 50**). O coeficiente de correlação ( $r$ ), calculado no nível de pixel, varia entre -0,785 e 0,597, indicando uma relação que vai de fortemente negativa a moderadamente positiva, dependendo da localização e das características das tipologias vegetais.

As áreas caracterizadas pelas maiores correlações positivas (em tons de azul e verde) são encontradas principalmente nos tipos de arbustos mais abertos, como CArA e CArAA. Nessas áreas, os valores de  $r$  indicam que a vegetação está realmente respondendo a mudanças na precipitação, como seria de se esperar para tipos que são mais dependentes da disponibilidade de recursos por curtos períodos e menos resilientes à variabilidade sazonal. Isso também é comprovado pelos coeficientes médios de determinação para esses tipos, com  $R^2 = 0,27$  para CArA e  $R^2 = 0,12$  para CArAA, que indicam uma relação fraca a moderada entre vigor vegetativo e precipitação.

Figura 50 - Correlação linear entre o EVI e a precipitação



Fonte: O autor

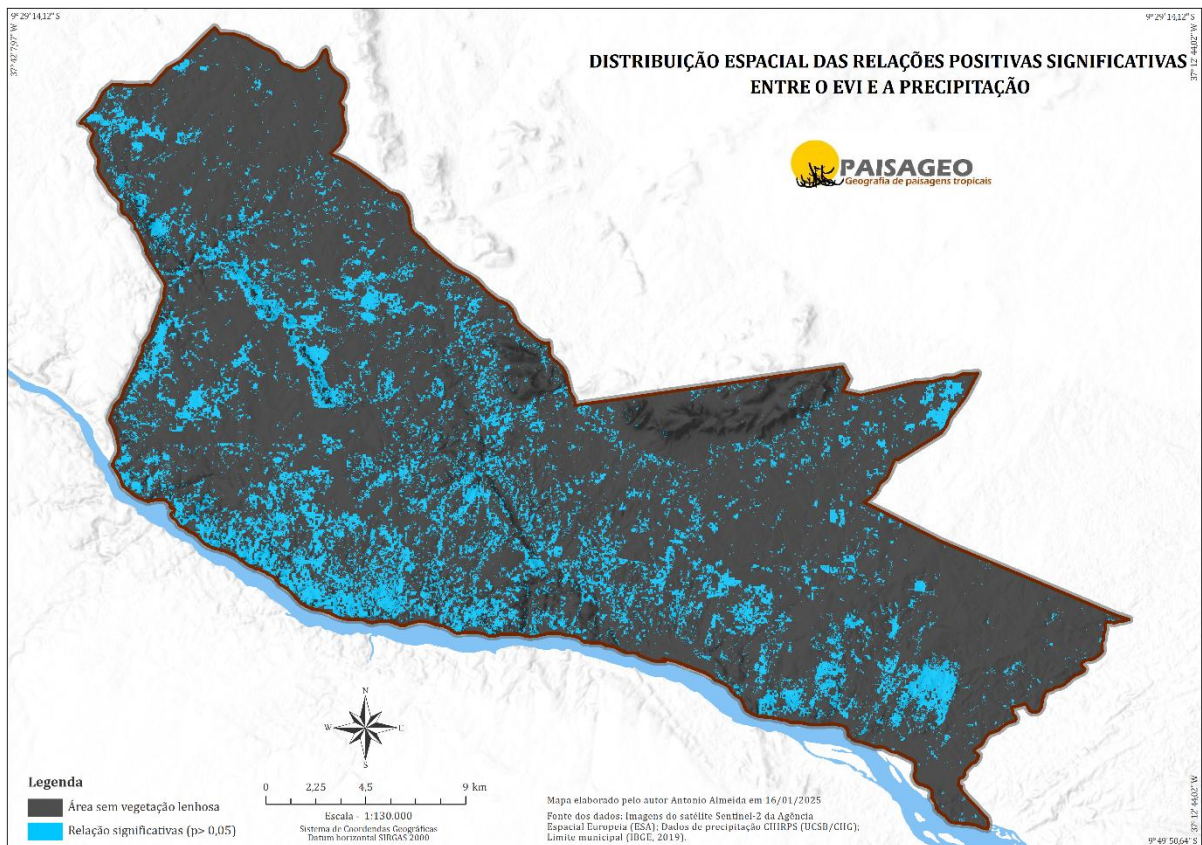
Em contraste, as áreas associadas aos tipos mais densos, como CAD e CAA, exibem coeficientes de correlação baixos, até mesmo negativos (tons amarelos, laranja e vermelhos). Sua fraca dependência do EVI na precipitação pode indicar uma maior capacidade desses tipos de sustentar sua biomassa durante as estações secas devido ao enraizamento mais profundo, maior capacidade de retenção de água ou talvez uma adaptação mais fisiologicamente estruturada às secas. Os coeficientes médios de determinação para esses tipos indicam que o desempenho em valores de  $R^2$  negativos é de -0,37 para CAD e -0,14 para CAA. Isso indica que a variação anual na disponibilidade ou privação de chuva é muito menos influente no vigor vegetativo dessas formações.

Desta forma, anos com maior precipitação anual mostram um aumento na produtividade da vegetação em comparação com a média de longo prazo, particularmente nas tipologias mais abertas. Por outro lado, nas tipologias arbóreas e mais densas, os sinais de correlação são, em sua maioria, não significativos, reforçando a ideia de que essas formações têm menor dependência direta da precipitação anual devido às suas estratégias adaptativas.

A **Figura 51** apresenta a distribuição espacial das relações positivas significativas entre o EVI e a precipitação ao longo da área de estudo, destacando que, para a maior parte do território, especialmente em tipologias arbustivas, a precipitação desempenha um papel determinante no vigor vegetativo.

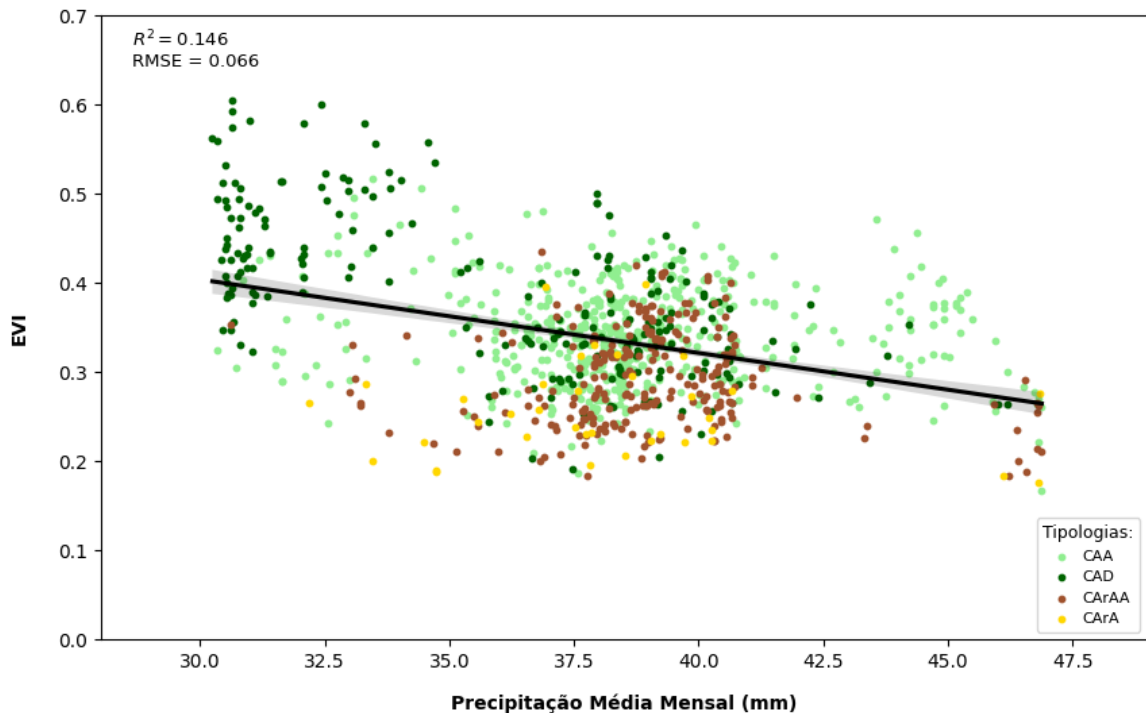
A análise da relação entre EVI e precipitação, conforme apresentado na Figura 50, junto à distribuição das correlações positivas significativas na Figura 51, evidencia a interação complexa entre fatores climáticos e as características estruturais das tipologias vegetais. A correlação geral fraca ( $R^2 = 0,146$ ), alinhada aos padrões observados na **Figura 52**, sugere que além da precipitação, outros fatores como temperatura, condições edáficas e pressões antrópicas podem ter influência significativa sobre a dinâmica da vegetação.

Figura 51 - Distribuição das relações positivas significativas entre o EVI e a precipitação



Fonte: O autor

Figura 52 - relação entre EVI e precipitação quanto as tipologias da caatinga



Fonte: O autor

Os resultados demonstram que tipologias arbustivas, como CArA e CArAA, são mais sensíveis à precipitação, respondendo de forma imediata às chuvas. Essa dependência direta é refletida no aumento dos valores de EVI durante os períodos chuvosos, indicando que essas formações vegetais dependem das variações hídricas para manter sua funcionalidade e completar seu ciclo de vida. Essa capacidade de rápida recuperação está associada a ajustes metabólicos eficientes, que permitem o restabelecimento do equilíbrio fisiológico (homeostase) após períodos de estresse hídrico, garantindo a continuidade do crescimento e desenvolvimento, mesmo em condições adversas (Souza, 2020).

Já as tipologias arbóreas densas, como a CAD, apresentam menor dependência da precipitação sazonal devido à sua estrutura altamente resiliente, que garante maior estabilidade do vigor vegetativo ao longo do tempo.

Uma estratégia adaptativa muito típica dessas espécies é desenvolver raízes longas e relativamente grandes para extrair umidade de aquíferos ou camadas mais profundas do solo, garantindo assim o suprimento de água por um longo período na estação seca. Além disso, órgãos vegetais como caules e raízes funcionam como unidades de armazenamento hídrico; o xilopódio desempenha um papel importante como um tipo de estrutura densa em água e



nutrientes que também auxilia na sobrevivência em condições extremas (Souza, 2020). Assim, essas adaptações mantêm o EVI relativamente estável mesmo em anos de baixa precipitação.

Neste contexto, a relação inversa do EVI com a precipitação em uma escala generalizada reflete a interação entre tipologias arbustivas e tipologias arbóreas. Esta dinâmica também inclui a consideração de diferentes estratégias de gestão ambiental especificamente com relação à vulnerabilidade de cada tipologia às mudanças climáticas e pressões antrópicas. Assim, tipologias abertas precisariam de ações que assegurassem a continuidade do regime hídrico, enquanto as densas precisariam de ações contra a degradação e preservação de suas características estruturais resilientes.

### 5.6.2 Padrões de resposta da vegetação ao ENSO

Sistemas florestais tropicais secos, como a Caatinga, são fortemente influenciados por variações climáticas e a disponibilidade da água no solo é um fator determinante na dinâmica da vegetação (Castro et al., 2018). As Oscilação Sul El Niño (ENSO), por sua vez, cria anomalias na temperatura da superfície do mar (SST) e, desta maneira, os eventos de precipitação em escala global, desempenha um papel crucial na regulação dos padrões de produtividade da vegetação (Dale et al., 2001). Assim, esta seção planeja analisar o impacto das anomalias SST associadas ao ENSO sobre a vegetação de Caatinga com base em dados do EVI e nas variações de SST durante as três fases (El Niño, La Niña e Neutro) entre 2016 e 2024.

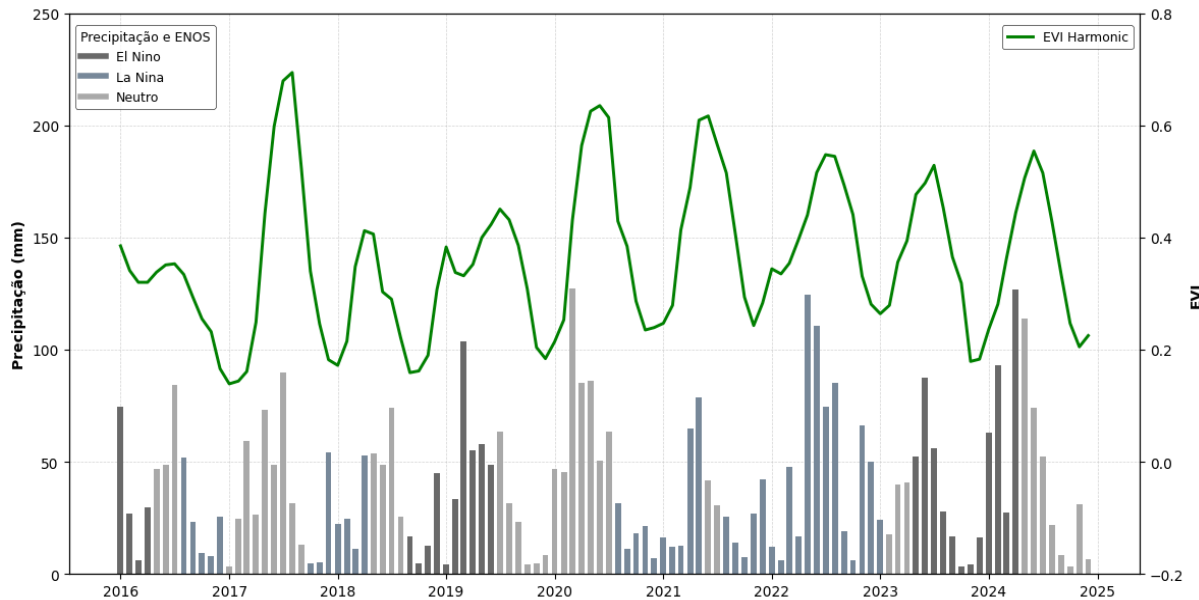
Durante a ocorrência de El Niño, as SSTs apresentam maior temperatura do que a média, ao contrário durante a La Niña, quando as SSTs são mais frias. A condição neutra reflete a presença de equilíbrio, quando nenhuma dessas fases extremas se faz sentir. Cada fase do ENSO tem padrões específicos de teleconexão climática que afetam a precipitação e, portanto, a resposta da vegetação (Capotondi et al., 2015). No decorrer das fases El Niño, a anomalia da TSM está associada a uma redução significativa na precipitação no Nordeste Brasileiro, o que resultará na influência direta da fenologia dos sistemas vegetais e na intensidade de eventos secos (Kane, 1997, Zou et al., 2021.)

A análise conjunta de ambos os gráficos (**Figuras 53 e 54**) revela o impacto das fases do ENSO ao longo dos meses de cada ano sobre a dinâmica da vegetação da Caatinga. Isso indicou como os padrões climáticos globais interagem com a sazonalidade da precipitação e características locais para modular a produtividade das plantas. Ambas as figuras permitem uma

interpretação mais aprofundada das teleconexões entre as anomalias de SST, precipitação e EVI.

A **Figura 53** mostra que a resposta da vegetação na Caatinga está estritamente ligada à sazonalidade da chuva, particularmente nos meses de precipitação máxima (geralmente entre março e julho). Durante episódios de El Niño, assim como nos anos de 2016, 2019 e 2023, as barras escuras indicaram uma queda acentuada na precipitação, particularmente durante os dois períodos críticos cruciais para o crescimento das plantas. Em 2016, apesar do déficit hídrico significativo, o EVI manteve-se relativamente estável, sugerindo resiliência adaptativa da vegetação.

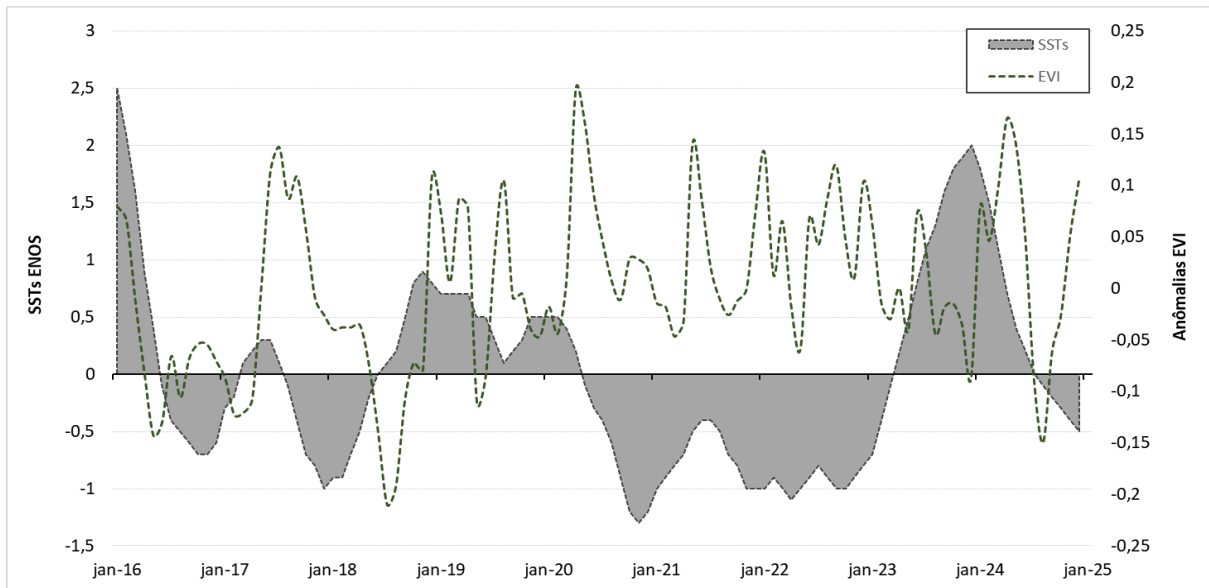
Figura 53 - Relação entre a precipitação mensal e o Índice de Vegetação EVI quanto os padrões climáticos do ENOS



Fonte: NOAA (2024). Adaptado pelo autor.

Essa resiliência é evidenciada pela **Figura 54**, que mostra uma alta correlação positiva entre as anomalias de SST e EVI ( $r = 0,733$ ) para esse ano, indicando que, mesmo com o aumento das SST, a vegetação foi capaz de mitigar os impactos climáticos adversos. Já em 2023, com redução similar na precipitação, observa-se uma correlação negativa moderada entre SST e EVI ( $r = -0,462$ ), o que pode estar relacionado a mudanças bruscas nas condições climáticas, afetando negativamente a vegetação.

Figura 54 - Correlação entre as anomalias de SST e EVI



Fonte: NOAA (2024). Adaptado pelo autor.

Nos episódios de La Niña em 2018, 2021 e 2022, chama a atenção a evidência de um aumento substancial da ocorrência, especialmente durante os meses chuvosos. Na Figura 53, esse padrão é evidenciado pelas barras mais altas, que indicam anos com maior pluviosidade, particularmente em 2021 e 2022, favorecendo o crescimento da vegetação e resultando no aumento dos valores de EVI. Essa relação é evidenciada pelas correlações positivas ( $r = 0,377$  em 2021 e  $r = 0,233$  em 2022) do aumento das SST, Figura 54, onde mostra que as condições climáticas criadas por La Niña promoveram uma maior produtividade vegetal nesses anos.

Ainda que os coeficientes de correlação sejam considerados fracos, é importante destacar que a resposta da vegetação não depende exclusivamente das anomalias das temperaturas oceânicas, sendo modulada por fatores locais, como a distribuição espacial da precipitação, o histórico perturbação e a composição florística. Além disso, defasagens temporais entre os picos de chuva e a resposta da vegetação podem reduzir a força estatística da correlação direta, explicando os valores relativamente baixos observados.

Durante anos neutros, como em 2017, 2020 e 2024, a Figura 53 demonstra uma relativa estabilidade nos padrões de variação do EVI, com flutuações moderadas ao longo do ano, sem os extremos observados durante os eventos de El Niño e La Niña. Na Figura 54, as correlações são muito baixas entre SST e EVI ( $r = 0,028$  em 2017,  $r = 0,093$  em 2020 e  $r = 0,394$  em 2024) indicando que, nesses anos a influência direta do ENSO foi mínima. O que pode indicar que, a dinâmica da vegetação parece ter sido determinada principalmente por fatores locais, como o regime de uso do solo e condições microclimáticas.

No entanto, um aspecto importante destacado por ambas as figuras é defasagem temporal potencial entre as precipitações, anomalias de SST e as respostas do EVI. Os eventos da ENSO, sendo fenômenos climáticos globais impactam o regime de variações e temperatura; no entanto, a resposta da vegetação depende de processos locais, contida na disponibilidade hídrica do solo, a eficiência do uso da água pelas plantas e as características fenológicas das espécies. Isso explica por que as oscilações no EVI, embora influenciadas pelos padrões de ENSO, não apresentam uma correspondência direta e imediata com os valores de SST.

A tabela abaixo mostra as correlações entre as anomalias de EVI e SST, divididas pelos períodos climáticos (El Niño, La Niña e Neutro) e sazonalidades chuvosa e seca correspondentes. Dessa forma, os valores indicam a interação complexa entre os processos climáticos globais acima mencionados e suas respostas fenológicas locais, mostrando que as oscilações no EVI não correspondem diretamente aos padrões de SST (globais), mas são moduladas por processos ecológicos regionais.

Tabela 13 - correlações entre as anomalias de EVI e SST, divididas pelos períodos climáticos e sazonalidades

Episódios Do Enso	Correlação De Anomalia EVI-SST (R)		
	<i>Estação Chuvosa</i>	<i>Estação Seca</i>	<i>Período Tota</i>
El Niño	0,788	-0,300	0,265
Neutro	-0,158	-0,988	0,181
La Niña	0,881	-0,394	-0,432

Fonte: NOAA (2024)

Durante os episódios de El Niño, a manifestação positiva significativa no período chuvoso ( $r=0,788$ ) sugere que mesmo nas condições de redução de previsões típicas desse evento, a vegetação Caatinga mantém uma capacidade favorável de resposta sob variações na umidade disponível. Esse comportamento pode ser explicado pela alta plasticidade de muitas espécies da Caatinga, que, como ressalta Souza (2020), conseguem ajustar rapidamente seu metabolismo às variações ambientais e intensifica sua atividade fotossintética. No entanto, no período seco, a correlação moderadamente negativa ( $r = -0,300$ ) reflete um impacto mais severo das condições de El Niño, acentuando o estresse hídrico já característico da estação seca. Essa vulnerabilidade evidencia que a vegetação é mais suscetível às variações climáticas globais quando a disponibilidade hídrica é naturalmente limitada.

No ENSO neutro, a resposta de EVI foi de fraca correlação, com valores decrescentes em relação ao período de precipitações ( $r = -0,158$ ) e extremamente negativos em relação ao período seco ( $r = -0,988$ ). A correlação fraca para o período chuvoso indica que, em anos sem eventos climáticos globais marcantes, a resposta do EVI é mais influenciada por fatores locais, como o regime de precipitação sazonal. Já a correlação extremamente negativa para o período seco sugere que, na ausência de uma modulação climática externa como La Niña ou El Niño, fatores locais de degradação como desmatamento, fragmentação da vegetação e compactação do solo intensificam os impactos da seca sobre a vegetação, agravam o estresse hídrico.

Por outro lado, a resposta da vegetação durante os La Niña é muito mais pronunciada, com uma correlação muito forte no período chuvoso ( $r = 0,881$ ). Ou seja, durante os eventos de La Niña, a vegetação responde de forma mais vigorosa devido à maior disponibilidade hídrica. Souza (2020) ressalta que os períodos de maior disponibilidade de água são acompanhados por maior produção das espécies da Caatinga, elevando a produção de biomassa devido à aceleração de sua atividade metabólica e fotossintética. Entretanto, a correlação moderadamente negativa ( $r = -0,394$ ), pode indicar que mesmo durante eventos de La Niña, os meses secos ainda apresentam restrições para a produtividade da vegetação, reforçando o cenário de sazonalidade do clima semiárido.

## 5.7 CONCLUSÃO

Com base na premissa de que as tipologias da Caatinga estão em constante dinâmica ecológica, intrinsecamente influenciadas pelas perturbações antrópicas, este capítulo revelou o impacto significativo dessas intervenções sobre a estrutura e produtividade da vegetação. As perturbações humanas, comprometem a estrutura vegetal, gerando alterações que variam desde regressões a estados vegetativos simplificados até avanços para estágios de maior complexidade, dependendo da intensidade e da natureza dos distúrbios.

Os resultados apontam que as tipologias arbóreas, como a CAD e a CAA, demonstram maior resiliência e capacidade regenerativa, evidenciadas por valores mais elevados de EVI, mesmo em contextos de pressão antrópica. Em contrapartida, as tipologias arbustivas, como a CArA e a CArAA, são mais suscetíveis a degradações persistentes, apresentando maior instabilidade e menor capacidade de recuperação após perturbações. Essa diferença reflete a dinâmica ecológica da Caatinga, onde a intensidade e a frequência das perturbações determinam

a trajetória sucessória, influenciando se a vegetação avançará para estágios mais complexos ou regredirá para formações mais simplificadas.

A análise demonstra, ainda, a importância dos aspectos climatológicos, uma vez que grande parte de sua dinâmica de produtividade é regida pela precipitação. A relação entre aspectos antrópicos e climatológicos é determinante na conformação da estrutura e funcionalidade da vegetação, revelando que, mesmo que as tipologias mais abertas sejam mais vulneráveis às variações hídricas sazonais, possuem baixa capacidade de regeneração frente a pressão antrópica. Já as tipologias arbóreas, possuem maior estabilidade estrutural graças as suas adaptações morfológicas e fisiológicas como raízes de maior profundidade e capacidade hídrica de retenção.

Por fim, os dados também revelaram padrões espaciais de fragmentação e degradação, indicando áreas críticas que requerem intervenções urgentes. A configuração estrutural da Caatinga é diretamente afetada pela baixa conectividade ecológica, especialmente em regiões associadas às tipologias arbustivas, que enfrentam maior pressão e apresentam menores níveis de regeneração.

## **6 DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO SOLO E RESPOSTA DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES FORMAÇÕES E ESTÁGIOS SUCESSIONAIS DE CAATINGA**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

A disponibilidade hídrica no solo é um dos principais fatores que controlam a produtividade vegetal em ecossistemas semiáridos, influenciando diretamente a biomassa, os padrões fenológicos e a resiliência das espécies ao estresse hídrico. Dessa forma, compreender como diferentes formações e estágios sucessionais respondem às variações hídricas do solo é essencial para avaliar a estabilidade ecológica do bioma e os impactos das perturbações antrópicas.

A produção vegetal na Caatinga está diretamente relacionada à umidade presente no solo, o qual exerce um fator determinante nos fluxos de carbono e na eficiência hídrica das plantas, influenciando processos como a fotossíntese e a acumulação de biomassa (Bai et al., 2008; Los et al., 2006). A precipitação é a principal entrada deste recurso, no qual controla a distribuição da umidade do solo e assim, influenciando processos bióticos quanto abióticos e definindo a quantidade de água acessível à vegetação (Rodríguez-Iturbe, 2000; Weltzin et al., 2003). No entanto, a baixa disponibilidade hídrica pode reduzir de forma significativa a produção de biomassa, influenciando assim a resiliência da vegetação, em condições extremas, contribuindo para a mortalidade das árvores (Pereira et al., 2006).

Diante desse cenário, muitas espécies lenhosas da Caatinga adotam estratégias morfológicas e fisiológicas para enfrentar o déficit hídrico, como a caducifolia, armazenamento de água em tecidos vegetais, que reduzem perdas de biomassa e favorecem a conservação hídrica (Santos et al., 2021; Queiroz et al., 2006). Durante a estação seca, essas espécies entram em dormência metabólica, minimizando a transpiração, e, com o retorno das chuvas, retomam rapidamente o crescimento, promovendo a recuperação da biomassa e o aumento da produtividade primária líquida (Fernandes e Queiroz, 2018; Stan e Sanchez-Azofeifa, 2019; Verduzco et al., 2015).

No entanto, a intensificação das perturbações antrópicas e a maior frequência de eventos climáticos extremos podem comprometer a resiliência da vegetação, promovendo alterações estruturais e funcionais (Carreiro et al., 2022). Diante desse cenário, torna-se fundamental analisar a eficiência hídrica pela vegetação, a fim de compreender as estratégias adaptativas das espécies e sua dinâmica ecológica frente às pressões ambientais.

A relação entre precipitação e produtividade vegetal é um importante indicador da estabilidade dos ecossistemas semiáridos, sendo útil na prevenção da degradação e desertificação (Le Houérou, 1984; Bai et al., 2008). Contudo, perturbações como desmatamento, queimadas e manejo inadequado reduzem a infiltração de água, aumentam a evaporação e comprometem a retenção de umidade, o que agrava a degradação do solo e da vegetação (Silva et al., 2019; Palácio et al., 2013).

Para avaliar a resposta da vegetação às variações na disponibilidade hídrica, especialmente em regiões semiáridas como a Caatinga, alguns indicadores têm sido empregados. Entre eles, destacam-se a eficiência do uso da água (WUE, do inglês *Water Use Efficiency*) e a eficiência do uso da chuva (RUE, do inglês *Rain Use Efficiency*), ambos fundamentais para entender os efeitos das limitações hídricas sobre a produtividade vegetal e detectar sinais de degradação ambiental.

A WUE representa um conceito fundamental para avaliar a quantidade de biomassa produzida por unidade de água utilizada, sendo um indicador-chave para avaliar o grau de tolerância ao estresse hídrico e avaliar a resposta da vegetação à disponibilidade hídrica (Hatfield e Dold, 2019). Já a RUE expressa a razão entre a produtividade primária líquida e a precipitação recebida, sendo amplamente utilizada como indicador funcional em ecossistemas áridos e semiáridos (Le Houérou, 1988). Por refletir diretamente a eficiência com que a vegetação converte a água das chuvas em biomassa, a RUE tem sido aplicada para detectar impactos da variabilidade climática e identificar processos de degradação ambiental (Le Houérou, 1984; Prince et al., 1998).

Em ecossistemas degradados, os valores de RUE tendem a apresentar valores mais baixos, devido à menor capacidade de retenção de umidade e ao aumento do escoamento superficial (Wessels et al., 2007). Por outro lado, sob o mesmo regime de precipitação, áreas menos impactadas conseguem reter mais água e gerar maior biomassa, refletindo valores mais elevados de RUE (Zhang et al., 2020; Liu et al., 2020).

A utilização integrada da RUE com variáveis ambientais, como umidade superficial do solo, evapotranspiração e temperatura da superfície terrestre, permite uma análise mais abrangente da eficiência hídrica da vegetação. Essa abordagem possibilita identificar padrões espaciais e temporais que evidenciam a estabilidade ecológica ou a vulnerabilidade das diferentes formações vegetais frente aos distúrbios ambientais (Hu et al., 2010).

Diante desse contexto, este capítulo tem como objetivo analisar as relações entre a disponibilidade hídrica no solo e a resposta da vegetação em diferentes tipologias e estágios



sucessionais da Caatinga. Considerando que a produtividade vegetal está intimamente ligada à disponibilidade hídrica, busca-se compreender como fatores ambientais e antrópicos influenciam a eficiência hídrica da vegetação.

Desta maneira, parte-se da hipótese de que a eficiência hídrica das formações vegetais da Caatinga é influenciada tanto por características estruturais da vegetação quanto por perturbações humanas. Especificamente, assume-se que áreas mais impactadas apresentam menor capacidade de retenção de umidade, maior exposição do solo e alterações nos fluxos hidrológicos, resultando em maiores perdas por evapotranspiração e menor eficiência no uso da água.

## 6.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo se baseia na análise da disponibilidade hídrica da vegetação lenhosa da Caatinga por meio da integração de variáveis hidrológicas derivadas do sensoriamento remoto. A abordagem metodológica adotada contempla a aquisição, o processamento e a análise de dados espaciais e temporais, com o objetivo de avaliar a eficiência do uso da água pelas diferentes tipologias vegetais da Caatinga sob a influência de perturbações antrópicas.

Para isso, foram integradas diversas fontes de dados provenientes de sensores remotos e registros climáticos, a fim de estimar as variáveis necessárias à caracterização da dinâmica vegetação. Todas as etapas de processamento foram realizadas na plataforma Google Earth Engine (GEE), que viabilizou o manuseio de grandes volumes de dados e automação das análises.

### 6.2.1 Aquisição e Pré-processamento dos Dados

A estimativa da produtividade da vegetação e da eficiência hídrica na Caatinga foi realizada a partir da integração de dados ópticos, térmicos, altimétricos e climáticos, oriundos de múltiplas plataformas de sensoriamento remoto e reanálise climática.

#### 6.2.1.1 Dados de sensoriamento óptico

Foram utilizadas imagens dos sensores Sentinel-2 MSI (com resolução espacial de 10 m) e Landsat 8 (com resolução de 30 m), a partir das quais foram extraídos alguns índices espectrais de vegetação, conforme aplicação específica de cada análise. O EVI, foi empregado

para avaliar a atividade vegetativa e, com base nessa métrica, calcular a Eficiência do Uso da Chuva (RUE). O NDVI, derivado do Sentinel-2, foi aplicado para analisar a relação entre a vegetação e a umidade do solo. Já o NDVI extraído das imagens Landsat 8 serviu como uma das variáveis de entrada no modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), a fim de estimar a evapotranspiração real e determinar a emissividade da superfície.

#### 6.2.1.2 Dados térmicos e temperatura da superfície

Foram empregadas imagens térmicas do sensor TIRS (banda TIRS-1) do Landsat 8 para a extração da temperatura de brilho, posteriormente processada e corrigida radiometricamente para obtenção da temperatura da superfície terrestre (LST), com resolução reprojeta para 30 metros.

#### 6.2.1.3 Dados topográficos:

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido a partir da missão NASADEM (resolução de 30 metros) e utilizado no cálculo do Índice Topográfico de Umidade (TWI), permitindo avaliar o efeito da topografia na redistribuição e retenção da umidade do solo, e sua influência sobre a resposta ecofisiológica da vegetação.

#### 6.2.1.4 Dados climáticos:

Os dados de precipitação foram extraídos da base CHIRPS, que oferece cobertura diária desde 1981, com resolução espacial de  $0,05^\circ$  (~5,5 km). Para compatibilizar esses dados com os demais produtos utilizados na modelagem eco-hidrológica — em especial os índices espectrais de vegetação e a evapotranspiração estimada via modelo SEBAL —, aplicou-se uma técnica de suavização espacial com base no operador `focalMean(10, 'square')`. Após o processamento, os dados de precipitação foram agregados em médias anuais para integração com os índices espectrais de vegetação.

Adicionalmente, variáveis meteorológicas como temperatura do ar e radiação solar foram obtidas da base ERA5-Land (ECMWF) e empregadas na calibração das estimativas de evapotranspiração via modelo SEBAL.

#### 6.2.1.5 Integração com dados dos capítulos anteriores:

Os dados utilizados neste capítulo foram preparados a partir das etapas metodológicas descritas nos Capítulos 3 e 4. A máscara de vegetação, definida no Capítulo 3, foi aplicada para garantir que os índices fossem aplicados efetivamente em áreas cobertas por vegetação lenhosa, a fim de evitar ruídos nos dados e comprometer a interpretação dos índices espectrais. A classificação das tipologias instituída no Capítulo 4, foi empregado para permitir uma análise distinta entre as diferentes formações e estágios sucessionais da Caatinga, garantindo maior precisão na interpretação das variações espaço-temporais.

### 6.2.2 Método e Análise dos Dados

#### 6.2.2.1 Eficiência do Uso Da Chuva (RUE)

A Eficiência do Uso da Chuva (RUE – *Rain Use Efficiency*) foi utilizada como indicador para avaliar a relação entre a produtividade da vegetação lenhosa da Caatinga e a disponibilidade hídrica, a partir da razão entre a produtividade primária e a precipitação acumulada. A estimativa da RUE foi realizada na plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando séries temporais anuais de dados entre 2016 e 2024. O cálculo seguiu a equação:

$$RUE = \frac{EVI}{P} \quad (23)$$

Onde: RUE representa a eficiência do uso da chuva; EVI representa a produtividade primária da vegetação; P é a precipitação acumulada no período.

O conceito de RUE foi originalmente proposto por Le Houérou (1984), sendo amplamente utilizado como métrica de avaliação da degradação da terra e da desertificação em ecossistemas áridos e semiáridos, onde se espera que a relação entre produtividade vegetal e precipitação se mantenha relativamente estável ao longo do tempo (Bai et al., 2008). Embora o NDVI seja tradicionalmente adotado como proxy da produtividade primária líquida acima do solo (ANPP), este estudo adotou o EVI, com base em evidências de que esse índice apresenta maior sensibilidade em áreas de vegetação densa e reduz interferências atmosféricas (Ponce-Campos et al., 2013; Zhao et al., 2018).

O EVI foi derivado de imagens do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2 (produto *COPERNICUS/S2*), com resolução espacial de 10 metros. As imagens foram previamente filtradas para remoção de nuvens e composições errôneas, sendo posteriormente agregadas para o cálculo do valor médio anual pixel a pixel. O EVI foi obtido a partir da seguinte equação:

$$EV = G \cdot \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L)} \quad (24)$$

Onde, *RED*, *BLUE* e *NIR* representam as medições de reflectância de superfície adquiridas nas regiões visível (vermelho e azul) e infravermelho próximo, respectivamente; enquanto *G* é o fator de ganho (2.5), *C<sub>1</sub>* e *C<sub>2</sub>* são coeficientes de correção atmosférica (6 e 7.5, respectivamente), e *L* é o fator de correção do solo (1).

A precipitação anual foi obtida a partir do conjunto de dados CHIRPS. As imagens diárias de precipitação foram somadas anualmente para cada pixel da área de estudo, conforme a equação:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (25)$$

Onde: *P<sub>i</sub>* representa a precipitação de cada período *i* ao longo do ano.

### *Aplicação dos Resultados*

A análise da RUE considerou diferentes perspectivas para compreender sua variação no tempo e no espaço. Inicialmente, a análise temporal da RUE permitiu identificar tendências ao longo dos anos, evidenciando mudanças na eficiência hídrica da vegetação e possibilitando a detecção de áreas onde a produtividade vegetal se mantém estável, mesmo sob condições climáticas adversas. Posteriormente, a distribuição espacial da RUE foi mapeada para diferentes tipologias da Caatinga, permitindo avaliar padrões de retenção hídrica e a resposta da vegetação em distintos estágios sucessionais.

### 6.2.2.2 Evapotranspiração (ET)

A estimativa da evapotranspiração (ET), expressa em milímetros por dia ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ), foi realizada por meio do modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), implementado na plataforma Google Earth Engine (GEE) através do módulo geeSEBAL, desenvolvido por Laipelt et al. (2021). Este algoritmo foi projetado para possibilitar o monitoramento de longo prazo da evapotranspiração, especialmente em regiões com escassez de dados meteorológicos, como a Caatinga, ao reduzir a dependência de entradas atmosféricas tradicionais por meio de calibração automática baseada em imagens de satélite.

O modelo SEBAL estima a ET diária a partir da equação do balanço de energia da superfície, utilizando imagens dos satélites Landsat e dados meteorológicos reanalisados do ERA5 Land. O fluxo de trabalho do geeSEBAL envolve o pré-processamento das imagens de sensoriamento remoto, a seleção automática de pixels de referência para a calibração do modelo e a resolução das equações que compõem o balanço energético da superfície, permitindo o cálculo da evapotranspiração real em escala de paisagem

O algoritmo também se destaca pela sua escalabilidade e acessibilidade, sendo executável diretamente no ambiente GEE por meio de código aberto desenvolvido em Python e JavaScript, disponível no repositório oficial: <https://github.com/et-brasil/geesebal>.

#### *Modelo SEBAL*

O modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), proposto por Bastiaanssen et al. (1998a, 1998b), estima a evapotranspiração diária ( $ET_n$ ) com base no balanço de energia da superfície terrestre, segundo a equação:

$$R_n - G = LE + H \quad (26)$$

Onde: LE (Latent Heat Flux) = Fluxo de calor latente (evapotranspiração);  $R_n$  (Net Radiation) = Radiação líquida na superfície; G (Soil Heat Flux) = Fluxo de calor no solo; H (Sensible Heat Flux) = Fluxo de calor sensível.

O fluxo de calor latente (LE) é obtido como o resíduo da equação de balanço de energia:

$$LE = R_n - H - G \quad (27)$$

### *Estimativa dos Componentes do Balanço de Energia*

#### 1. Radiação Líquida (R<sub>n</sub>):

$$R_n = (1 - \alpha)R_s^\downarrow + R_l^\downarrow - R_l^\uparrow - (1 - \varepsilon)R_l^\downarrow \quad (28)$$

Onde:  $\alpha$  = Albedo da superfície;  $R_s^\downarrow$  = Radiação solar incidente;  $R_l^\downarrow$  = Radiação de onda longa incidente e emitida;  $\varepsilon$  = Emissividade da superfície.

#### 2. Fluxo de Calor no Solo (G):

$$G = R_n \times (0.0038 + 0.0074\alpha)(1 - 0.98 \times NDVI^4) \quad (29)$$

Onde: NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

#### 3. Fluxo de Calor Sensível (H):

$$H = \rho C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (30)$$

Onde:  $\rho$  = Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>);  $C_p$  = Calor específico do ar (J/kg·K);  $dT$  = Diferença de temperatura entre a superfície e a atmosfera;  $r_{ah}$  = Resistência aerodinâmica.

### **Seleção Automática de Pixels de Referência (geeSEBAL)**

A versão geeSEBAL automatiza a calibração dos fluxos LE, H e G, selecionando:

- Pixel quente (hot pixel): área seca onde LE = 0
- Pixel frio (cold pixel): área úmida onde H = 0

Essa abordagem reduz a dependência de dados meteorológicos externos, tornando o modelo mais prático para análises em larga escala e séries temporais.

### *Estimativa da Evapotranspiração Diária (ET<sub>n</sub>)*

1. Fração evaporativa ( $\Lambda$ ):

$$\Lambda = \frac{LE}{(R_n - G)} \quad (31)$$

2. Evapotranspiração diária ( $ET_{(24h)}$ ):

$$ET_{24h} = \frac{\Lambda R_{n,24h}}{\lambda} \quad (32)$$

Onde:  $R_{n,24h}$  = Radiação líquida acumulada ao longo de 24 horas;  $\lambda$  = Calor latente de vaporização da água.

### *Aplicação dos Resultados*

A análise da ET foi realizada com a finalidade de examinar sua variação ao longo do tempo e do espaço, além de sua conexão com elementos climáticos. Primeiramente, foram determinadas médias ao longo do tempo para refletir tendências sazonais e interanuais, ressaltando os momentos de maior e menor consumo hídrico. Posteriormente, uma análise da distribuição espacial da ET foi realizada entre as diversas tipologias e estágios sucessionais da Caatinga. Por fim, a ET foi relacionada com a precipitação e a temperatura da superfície terrestre (LST), permitindo avaliar a resposta da vegetação às variações nas condições climáticas.

#### 6.2.2.3 Umidade Superficial do Solo (SSM)

A estimativa da Umidade Superficial do Solo (SSM – *Soil Surface Moisture*), expressa em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , foi realizada por meio do modelo OPTRAM (*OPTical TRAppezoid Model*), implementado na plataforma Google Earth Engine (GEE). Desenvolvido por Sadeghi et al. (2015), o OPTRAM permite estimar a umidade do solo superficial a partir de dados ópticos de sensoriamento remoto, dispensando o uso direto da temperatura da superfície, comumente empregada em modelos tradicionais.

O modelo baseia-se na relação entre o NDVI e a Reflectância Transformada do Infravermelho de Onda Curta (STR – *Shortwave Infrared Transformed Reflectance*), extraída da banda SWIR. Essa relação é representada graficamente por uma estrutura trapezoidal, em

que os limites superior e inferior indicam, respectivamente, condições de solo úmido e solo seco.

De acordo com o princípio do OPTRAM, os pixels com maior umidade se concentram na borda superior do trapézio (borda úmida), enquanto os pixels associados a menor umidade se alinham à borda inferior (borda seca) (Sadeghi et al., 2017).

### *Modelo OPTRAM*

O modelo OPTRAM estabelece uma relação linear entre o grau de saturação do solo e a refletância transformada do SWIR (STR). O teor de umidade do solo ( $W$ ), que varia entre 0 (solo seco) e 1 (solo saturado), é definido partir da relação:

$$W = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad (33)$$

Onde:  $W$  = Grau de umidade do solo;  $STR$  = Reflectância transformada do SWIR;  $STR_d$  = Valor de  $STR$  para solo seco;  $STR_w$  = Valor de  $STR$  para solo úmido.

A refletância transformada do SWIR ( $STR$ ) é calculada da seguinte forma:

$$STR = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (34)$$

Onde:  $R$  = Reflectância da superfície no domínio eletromagnético SWIR (~2130 nm, banda 12 do Sentinel-2).

Para definir os estados de solo seco e úmido, as bordas do trapézio são descritas pelas equações:

$$STR_d = i_d + s_d \times NDVI \quad (35)$$

$$STR_w = i_w + s_w \times NDVI \quad (36)$$

Onde:  $i_d$  e  $s_d$  representam a interceptação e a inclinação da borda seca;  $i_w$  e  $s_w$  representam a interceptação e a inclinação da borda úmida;  $NDVI$  = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.



Esses parâmetros são obtidos empiricamente a partir da análise da distribuição de pixels no espaço NDVI-STR.

### **Cálculo do STR e NDVI**

O NDVI foi calculado a partir das bandas NIR (B8) e RED (B4):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (37)$$

O STR foi calculado a partir da banda SWIR (B12):

$$STR = \frac{(1 - SWIR)^2}{2 \times SWIR} \quad (39)$$

Os valores de NDVI e STR foram extraídos para cada pixel e utilizados na parametrização do OPTRAM.

### *Aplicação dos Resultados*

A análise da SSM foi realizada com a finalidade de compreender sua variação ao longo do tempo, sua distribuição no espaço e sua relação com fatores ambientais. Primeiramente, foi calculada a média temporal da SSM para identificar padrões sazonais e interanuais na região de estudo. Em seguida, avaliou-se a distribuição espacial da umidade para entender as diferenças entre as tipologias da Caatinga e os avanços sucessionais da vegetação lenhosa. Por último, o SSM foi relacionado com a precipitação e a evapotranspiração para investigar como a umidade do solo responde às mudanças climáticas e aos impactos antrópicos na dinâmica da Caatinga

#### 6.2.2.4 Temperatura a Superfície Terrestre (LST)

A Temperatura da Superfície Terrestre (LST – *Land Surface Temperature*) representa a temperatura radiativa da superfície do solo ou do dossel vegetal, resultante da interação entre a

energia solar incidente e as propriedades físicas da superfície terrestre (Hulley et al., 2019). Por refletir diretamente as trocas de energia entre o solo e a atmosfera, a LST é considerada um indicador sensível a variações na cobertura do solo, nas condições ambientais e nos processos hidrológicos (Li et al., 2013; Teskey et al., 2014).

Neste estudo, a LST foi estimada com base na banda térmica 10 do sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor), a bordo do satélite Landsat 8. O processo de cálculo envolveu a conversão dos valores digitais (DN) em radiância espectral no topo da atmosfera (TOA), seguida da transformação para temperatura de brilho (BT – *Brightness Temperature*), com posterior correção pela emissividade da superfície, considerando as características da cobertura do solo.

As equações utilizadas em cada etapa são apresentadas a seguir.

#### *Conversão do Número Digital (DN) para Radiância Espectral ( $L_\lambda$ )*

Os valores de DN da banda térmica do Landsat 8 são convertidos para radiância espectral utilizando a equação:

$$L_\lambda = M_L \times DN + A_L \quad (40)$$

Onde:  $L_\lambda$  = Radiância espectral ( $W/m^2/sr/\mu m$ );  $M_L$  = Fator de multiplicação da radiância (fornecido nos metadados do Landsat 8);  $A_L$  = Fator de adição da radiância (fornecido nos metadados do Landsat 8); DN = Número digital do pixel da banda 10 do Landsat 8.

Os valores de  $M_L$  e  $A_L$  podem ser extraídos diretamente dos metadados da imagem Landsat 8 disponíveis no GEE.

#### *Conversão da Radiância Espectral para Temperatura de Brilho (TB)*

A Temperatura de Brilho (BT) é calculada a partir da radiância espectral usando a equação:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (41)$$

Onde: TB= Temperatura de Brilho em Kelvin (K); K1 e K2 = Constantes do sensor (fornecidas nos metadados);  $L\lambda$ = Radiância espectral.

Os valores padrão para o Landsat 8 TIRS são:

- K1=774.89
- K2=1321.08

#### *Correção da Emissividade da Superfície para Obter a LST*

A Temperatura da Superfície Terrestre (LST) é obtida a partir da Temperatura de Brilho (TB) corrigida pelo fator de emissividade ( $\epsilon$ ), que leva em consideração a cobertura da superfície. A equação utilizada é:

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left( \frac{\lambda \times T_B}{h \times c} \times \ln(\epsilon) \right)} \quad (42)$$

Onde: LST= Temperatura da superfície terrestre (K);  $\lambda$  = Comprimento de onda efetivo do sensor Landsat 8 (10.9 $\mu$ m para a banda 10); h = Constante de Planck (6.626 $\times 10^{-34}$ J $\cdot$ s); c = Velocidade da luz (2.998 $\times 10^8$ m/s);  $\epsilon$  = Emissividade da superfície

A emissividade é estimada a partir do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), considerando a fração de cobertura vegetal ( $F_v$ ):

$$F_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (43)$$

$$\epsilon = 0.004 \times F_v + 0.986$$

#### *Aplicação dos Resultados*

Os resultados da análise LST permitiram identificar padrões térmicos relacionados à disponibilidade hídrica ao longo do tempo e do espaço. A avaliação espacial entre as diferentes tipologias e estágios sucessionais da Caatinga evidenciou áreas mais suscetíveis ao estresse térmico. Além disso, a correlação da LST com a umidade SSM e com ET possibilitou

compreender como a cobertura vegetal e a umidade influenciam na regulação térmica da superfície.

#### 6.2.2.5 Índice de Umidade Topográfica (TWI)

O Índice de Umidade Topográfica (TWI – do inglês Topographic Wetness Index) é uma métrica bastante utilizada para estimar a distribuição espacial da umidade do solo com base em atributos do relevo. Derivado de Modelos Digitais de Elevação (DEM), tem sido aplicado em diversas escalas espaciais para caracterizar a dinâmica hídrica do solo (Gruber e Peckham, 2009). O índice foi originalmente proposto por Beven e Kirkby (1979) e é um dos mais empregados em modelos hidrológicos baseados em terreno.

A metodologia aplicada considerou a integração de dois componentes principais: a declividade local e o acúmulo de fluxo, segundo a seguinte equação:

$$TWI = \ln \ln \left( \frac{a}{\tan \tan \beta} \right) \quad (44)$$

Onde:  $a$  = Acúmulo de fluxo (flow accumulation), representando a área de contribuição da drenagem para um ponto específico;  $\beta$  = Declividade do terreno (slope), responsável pelo escoamento superficial da água.

Pesquisas anteriores indicam que o Índice Topográfico de Umidade (TWI) possui forte correlação com os níveis de umidade do solo obtidos em medições de campo, além de se relacionar com características edáficas (Chaplot e Walter, 2003). Esse índice tem sido amplamente empregado em estudos ecológicos voltados à vegetação, por oferecer subsídios importantes para compreender de que forma a variação do relevo interfere na distribuição da umidade e, por consequência, na organização e dinâmica das comunidades vegetais (Moeslund et al., 2013; Alexander et al., 2016; Fernandes et al., 2021).

### 6.3 VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DA CHUVA (RUE) NAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA SOB INFLUÊNCIA ANTRÓPICA

A Eficiência do Uso da Chuva (RUE) é uma métrica essencial para entender a relação entre precipitação e produtividade primária em ecossistemas semiáridos, tais como a Caatinga, caracterizados pela escassez hídrica e condições ambientais são extremas (Le Houérou, 1984; Huang e Xu, 2016; Stan et al., 2021; Dardel et al., 2014). Nesse bioma, a RUE permite avaliar a capacidade das formações vegetais em responder à variação hídrica disponível e aos impactos das atividades humanas, oferecendo conhecimento sobre a resiliência das diferentes tipologias e como estas conseguem se manter funcionais sob pressão antrópica.

Os valores de RUE observados nas formações da Caatinga revelaram diferenças significativas, refletindo variações na capacidade de uso eficiente da água entre as tipologias arbustivas e arbóreas. A **Tabela 1** apresenta os valores médios de RUE correspondentes a cada tipologia.

**Tabela 1** - Valores médios da RUE quanto as tipologias

Tipologias da Caatinga	Valores médios de RUE (g m <sup>2</sup> mm <sup>-1</sup> )
<i>Arbustiva Aberta</i>	0,566
<i>Arbórea Aberta</i>	0,746
<i>Arbórea Densa</i>	1,066
<i>Arbustiva-Arbórea Aberta</i>	0,621

Fonte: O autor

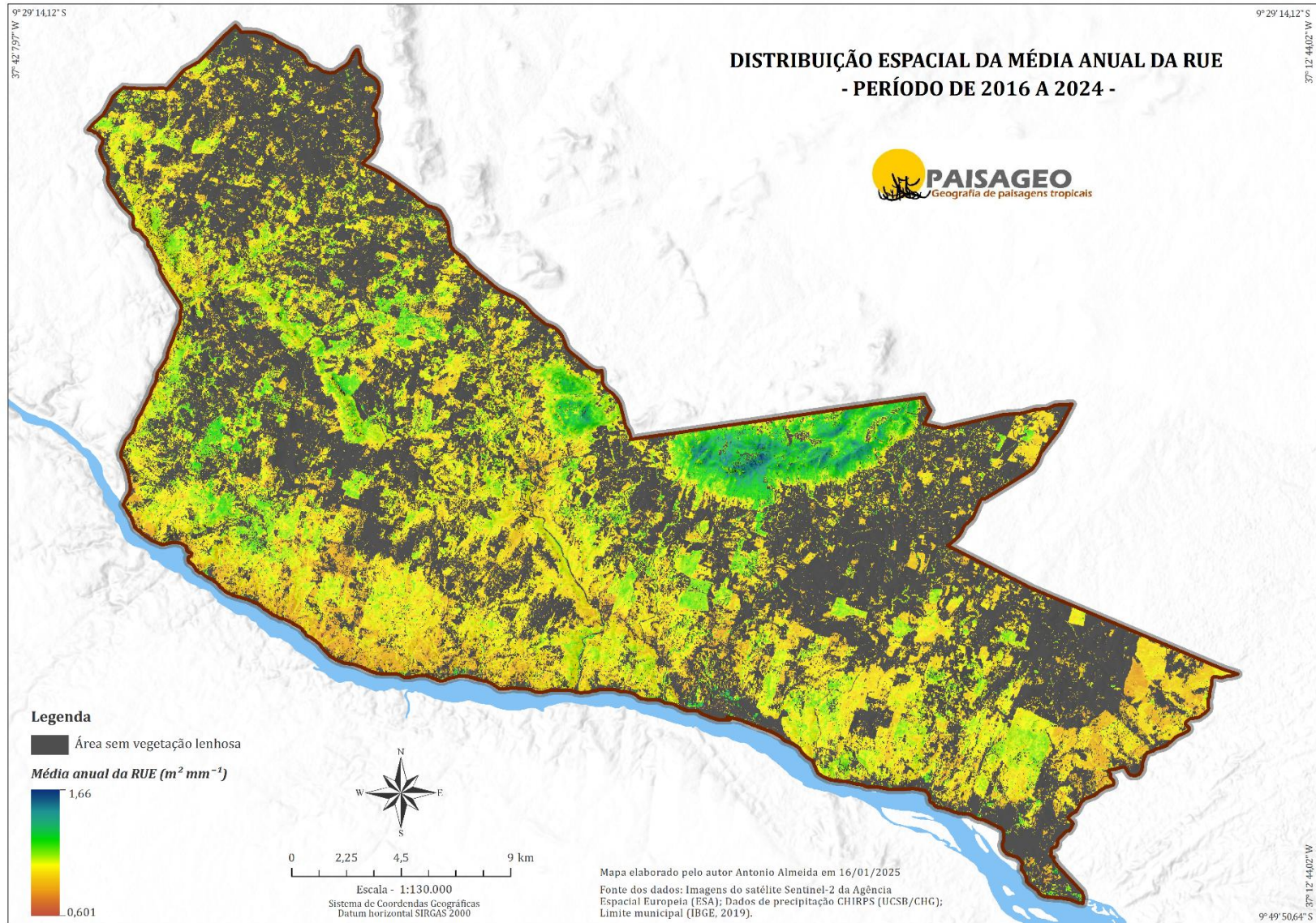
A representação espacial e temporal da RUE entre 2016 e 2024 por sua vez, oferece uma visão detalhada sobre a resposta das tipologias da Caatinga à disponibilidade hídrica e aos níveis de pressão antrópica (**Figura 55**). Em áreas menos impactadas por atividades humanas, onde a vegetação permanece mais estável, os valores de RUE são consistentemente mais altos (próximas de 1,66 g m<sup>2</sup> mm<sup>-1</sup>), indicando uma vegetação mais eficiente no uso da água e menos vulnerável a perturbações. Em contrapartida, regiões com RUE mais baixa (próximas de 0,6 g m<sup>2</sup> mm<sup>-1</sup>), coincidem com áreas de vegetação rala ou degradada, onde a pressão antrópica compromete diretamente a eficiência hídrica e a funcionalidade ecológica.

As áreas de cobertura arbóreas, como a CAD e a CAA, caracterizam-se por uma maior densidade de biomassa (Beuchle et al., 2015; Cabral et al., 2013), portanto, exibem altos valores de RUE, refletindo uma eficiência hídrica superior. Em média, A CAD apresenta médias mais

altas nos valores de RUE, alcançando  $1,66 \text{ gm}^2 \text{ mm}^{-1}$ , enquanto a CAA apresenta valores mais moderados, porém, ainda altos, indicando que esta tipologia apresenta uma boa capacidade de aproveitamento da água disponível no solo. Este fato pode ser explicado pelo alto desempenho da condição e estrutura das tipologias arbóreas. Tais características permitem que o solo permaneça parcialmente úmido por um longo período, o que suaviza a evaporação e aumenta o aproveitamento da água para suporte da biomassa e os processos ecológicos fundamentais (Wright et al, 2021; Paloschi et al., 2020; Sankaran et al., 2005).

Por outro lado, as tipologias arbustivas, como CArA e CArAA, apresentam menores valores de RUE, com médias em torno de  $0,6 \text{ g m}^2 \text{ mm}^{-1}$  mesmo em áreas menos impactadas. Devido à menor cobertura vegetal e menor acúmulo de biomassa, essas formações retêm menos umidade no solo e são mais suscetíveis à degradação, erosão e queda de produtividade, especialmente em áreas onde a presença humana é mais intensa (Araujo et al., 2022; Leite et al., 2018).

Figura 55 - Distribuição Espacial da Média Anual da RUE (2016 a 2024)

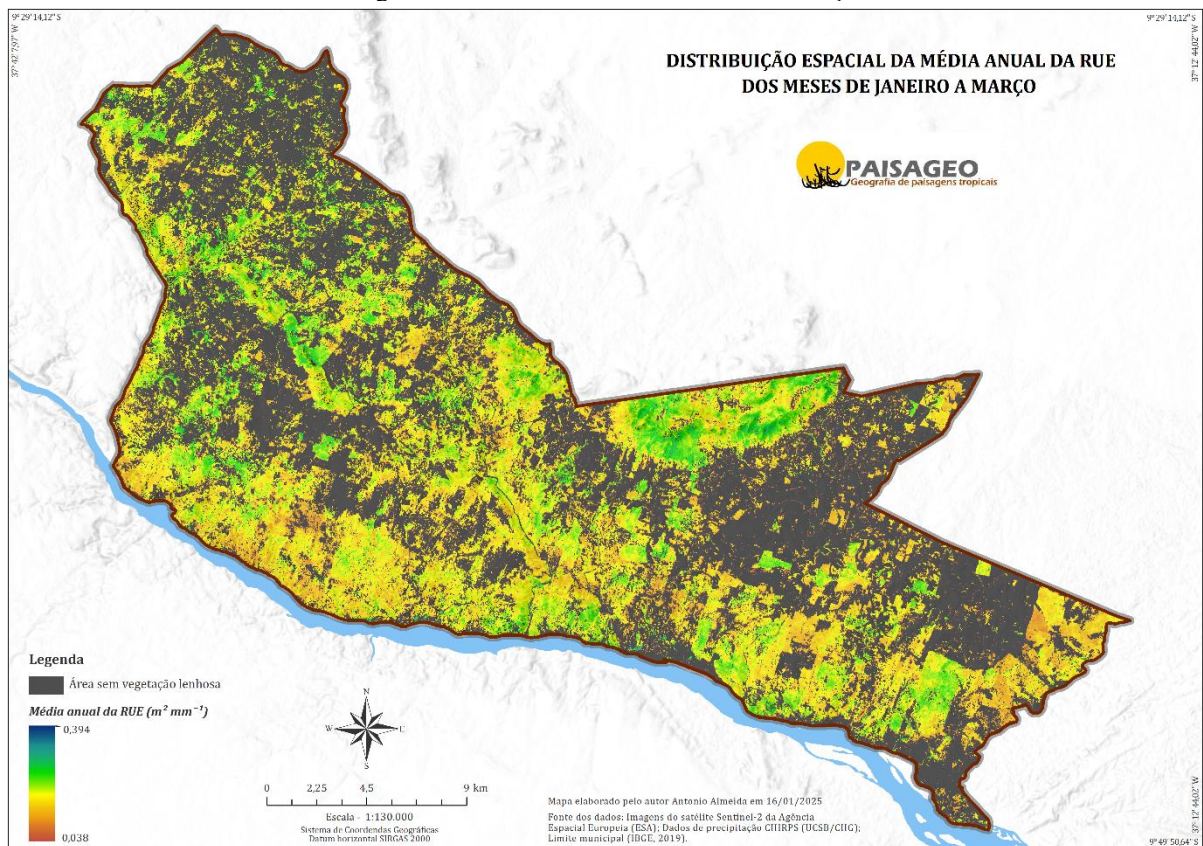


Fonte: O autor

No período analisado, as flutuações sazonais de RUE percebem uma forte relação com a variação da precipitação. Durante os meses de janeiro a março, que marcam a transição para a estação chuvosa (**Figura 56**), as variações de RUE vão de 0,017 a 0,394 g m<sup>2</sup> mm<sup>-1</sup>. Essa amplitude ainda apresenta eficiência hídrica moderada, pois as chuvas começam a se tornar mais comuns, mas ainda não atingem o pico da estação chuvosa.

Áreas com valores mais baixos de RUE, próximos de 0,017 g m<sup>2</sup> mm<sup>-1</sup>, podem apresentar limitações na capacidade de uso da água, muitas vezes devido a efeitos de degradação associados a distúrbios antrópicos. Já os valores mais altos de RUE nesse período indicam tipologias, como a CAD e a CAA, que começam a responder de maneira mais eficiente à disponibilidade de água, otimizando o uso hídrico para sustentar a biomassa.

Figura 56 - RUE nos Meses de Janeiro a março



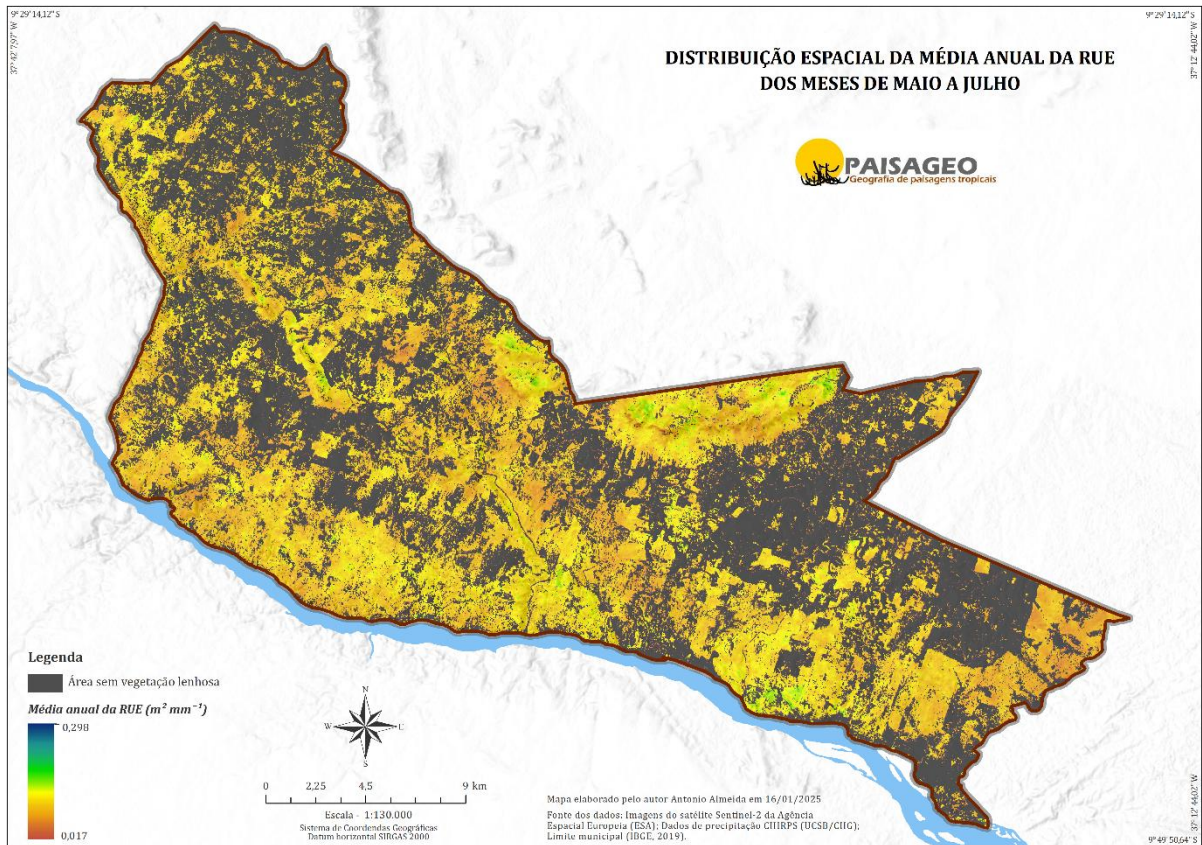
Fonte: O autor

No período de pico da estação chuvosa, de maio a julho, observa-se quedas relativas nos valores de RUE, variando entre 0,038 e 0,298 g m<sup>2</sup> mm<sup>-1</sup> (**Figura 57**). A condição é esperada em ecossistemas do tipo semiáridos, já que o excesso de água reduz a eficiência de uso da chuva, pois a vegetação, já saturada, não consegue converter toda a água adicional em biomassa (Dardel et al., 2014; Liu et al., 2010). Nesse cenário, tipologias como a CAD ainda conseguem



absorver e utilizar a água com eficiência relativa, enquanto tipologias arbustivas apresentam menores valores de RUE, demonstrando limitações na capacidade de aproveitamento hídrico em condições de alta precipitação.

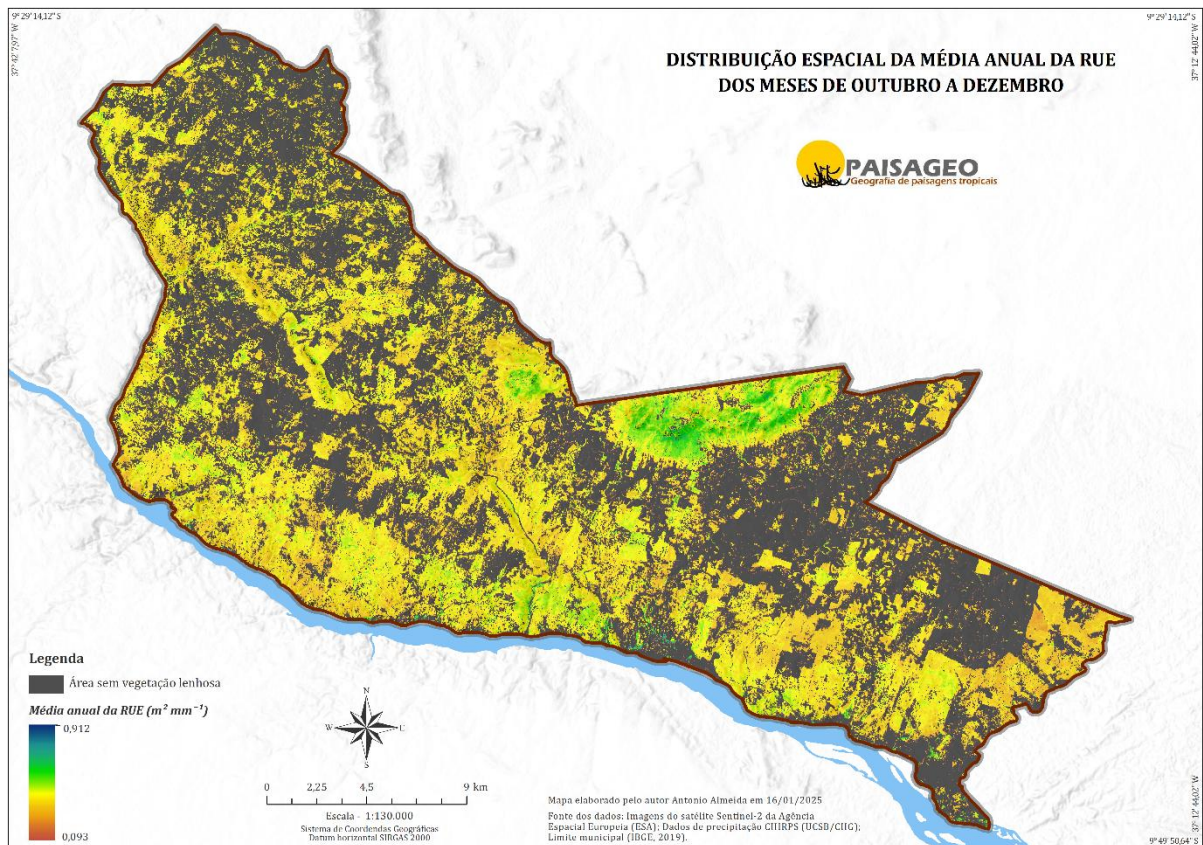
Figura 57 - RUE nos Meses de Maio a julho



Fonte: O autor

A RUE tem um padrão de resposta distinto ao longo dos períodos de transição de volta à estação seca, como observado entre outubro e dezembro (**Figura 58**). Nessa fase, os valores de RUE aumentam, chegando a  $0,912 g m^2 mm^{-1}$  em áreas de vegetação mais densa e resiliente, especialmente na CAD. Neste caso, o aumento na eficiência hídrica reflete a capacidade da vegetação em otimizar o uso da água durante períodos de menor disponibilidade hídrica (Pei et al., 2022; Bai et al., 2020). Em contraste, as formações arbustivas mantêm uma RUE mais baixa, indicando dificuldades em otimizar o uso da água disponível, o que as torna mais suscetíveis a condições de seca e degradação.

Figura 58 - RUE nos Meses de Outubro a dezembro



Fonte: O autor

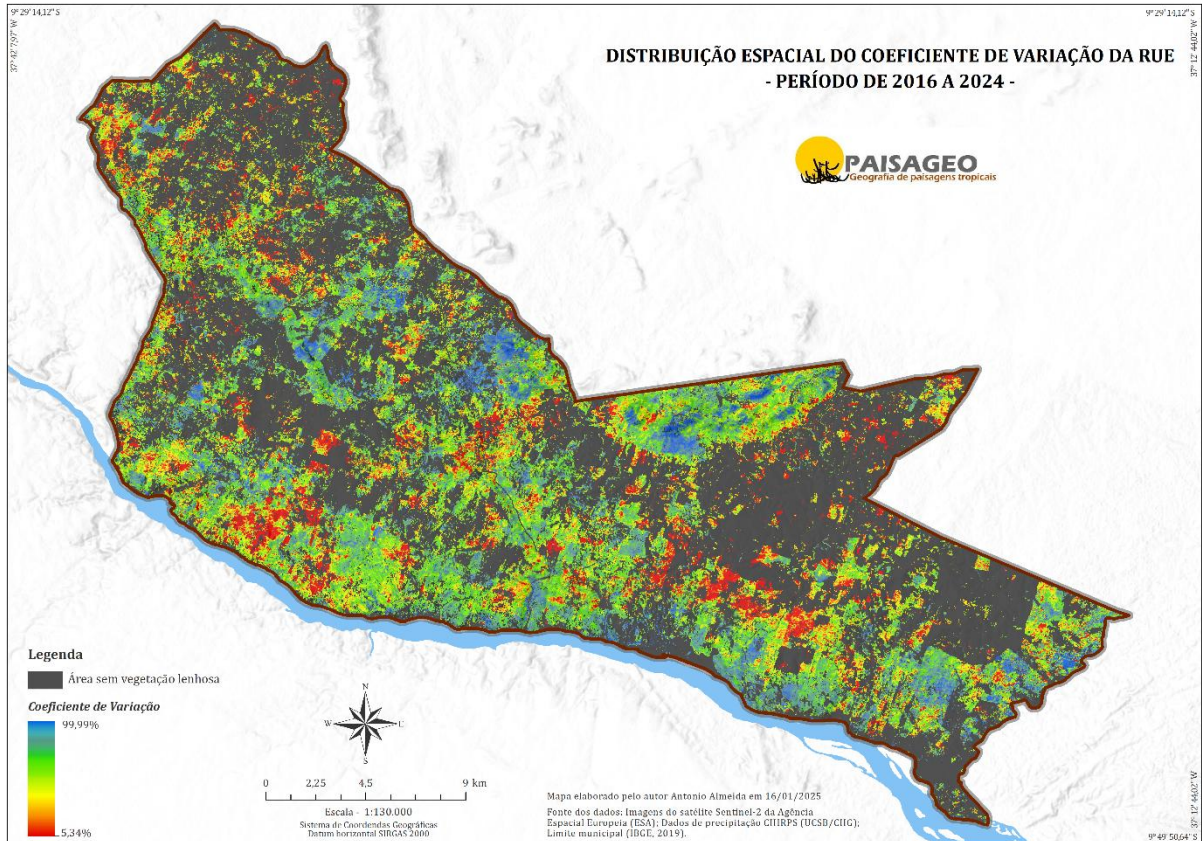
Estes resultados sugerem que a RUE na Caatinga é fortemente impactada pela estrutura da vegetação e a intensidade dos distúrbios antrópicos. Deste modo, os tipos mais densos como CAD e CAA são mais resistentes e eficientes no uso da água, especialmente em períodos secos. Os arbustivos, com menor densidade de biomassa, são mais vulneráveis à degradação e sua RUE é reduzida. A presença de manchas de baixa eficiência hídrica em áreas de alta pressão humana confirma que a capacidade de retenção de umidade e o aproveitamento hídrico são comprometidos diretamente pelos distúrbios, levando a uma perda gradual da funcionalidade ecológica e ao aumento da vulnerabilidade à desertificação (Stan et al., 2021; Bhaskar et al., 2018; Berdugo et al., 2017).

### 6.3.1 Análise da RUE por meio do coeficiente de variação nas tipologias da caatinga

A análise da variação RUE por meio do Coeficiente de Variação (CV) das diferentes tipologias, adiciona detalhes importantes sobre a estabilidade hídrica e a resposta da vegetação às condições ambientais e aos danos antrópicos (Figura 59). Tornando-se uma ferramenta

importante para compreender a consistência ou flutuação dos padrões de uso da água na vegetação, sobretudo, em um ecossistema onde a disponibilidade hídrica é limitada e a pressão humana é crescente.

Figura 59 - Distribuição espacial do CV do RUE



Fonte: O autor

A avaliação do CV nas diferentes tipologias da Caatinga revela distintos níveis de estabilidade e vulnerabilidade hídrica. Observa-se que a CAra apresenta o CV mais alto, com um valor de 93,551%. Esse valor elevado indica que a CAra possui uma grande variabilidade na RUE ao longo do tempo, refletindo uma instabilidade significativa no uso da água. Essa instabilidade pode estar associada à sua estrutura menos densa e à baixa capacidade de retenção hídrica do solo.

Essa alta variabilidade sugere que, em anos de baixa precipitação, a CAra tem dificuldade em manter sua produtividade, enquanto em anos de maior precipitação, a eficiência no uso da água ainda é limitada pela estrutura esparsa de sua vegetação. Por outro lado, a CAA apresentava o CV de 66,24%, o segundo maior entre as tipologias descritas. A CAA representa uma tipologia arbórea menos densa, com uma estrutura que permite maior adaptação entre as variações sazonais da precipitação, em comparação a formações estritamente arbustivas. A

presença de árvores, mesmo que espaçadas, proporciona uma certa capacidade de retenção de umidade e, com isso, um uso mais eficiente da água (Jesus et al., 2021; Leite et al., 2018). Contudo, a CAA ainda exibe uma variação significativa na RUE, sugerindo que, apesar de mais estável que a tipologias arbustivas, essa tipologia continua vulnerável a distúrbios e a anos de extrema variabilidade climática.

A CAD, por sua vez, apresenta o menor CV entre todas as tipologias, com um valor de 52,267%. Esse baixo CV indica uma alta estabilidade na RUE ao longo do tempo, sugerindo que essa tipologia é a mais eficiente e resiliente no uso da água. Essa estrutura, denominada por alguns pesquisadores de potencial hídrico foliar, proporciona uma cobertura que mantém a eficiência hídrica do solo mais estável, reduzindo as flutuações de umidade e permitindo uma utilização constante e eficiente da precipitação (Wright et al., 2021). Esse padrão de estabilidade torna a CAD uma tipologia crucial para a resiliência ecológica da Caatinga, atuando como um reservatório natural de regulação hídrica em um ambiente marcado por alta variabilidade climática.

Por fim, a CArAA, com um CV de 76,52%, situa-se entre a CArA e a CAA em termos de estabilidade. Como zona de transição entre formações abertas e densas, a CArAA apresenta características de ambas, refletindo em uma variabilidade moderada. Esse valor intermediário de CV indica que, embora seja mais estável que as tipologias estritamente arbustivas, ainda é mais vulnerável que as formações densas. Essa sensibilidade a condições climáticas e à pressão antrópica torna a CArAA um indicador crítico de estabilidade ambiental. Sob perturbação contínua, a CArAA pode rapidamente perder sua função de ligação entre áreas mais densas e abertas, resultando em declínio da RUE e redução da produtividade hídrica, destacando sua fragilidade em manter a eficiência hídrica diante de impactos.

#### 6.4 PADRÕES DE REPOSTAS ENTRE EFICIÊNCIA DO USO DA CHUVA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO NOS DISTÚRBIOS HÍDRICOS NAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA

Avaliar a evapotranspiração para as diferentes tipologias da Caatinga nos ajuda a entender como a produtividade vegetal é afetada pela disponibilidade de água e pela dinâmica da evaporação, sobretudo em áreas sofrendo distúrbio antrópico (Ferreira et al., 2020; Marques et al., 2020). As informações relacionadas à média anual da evapotranspiração por dia, em conjunto com as informações de RUE, permitem melhor compreender esse cenário, sobretudo,

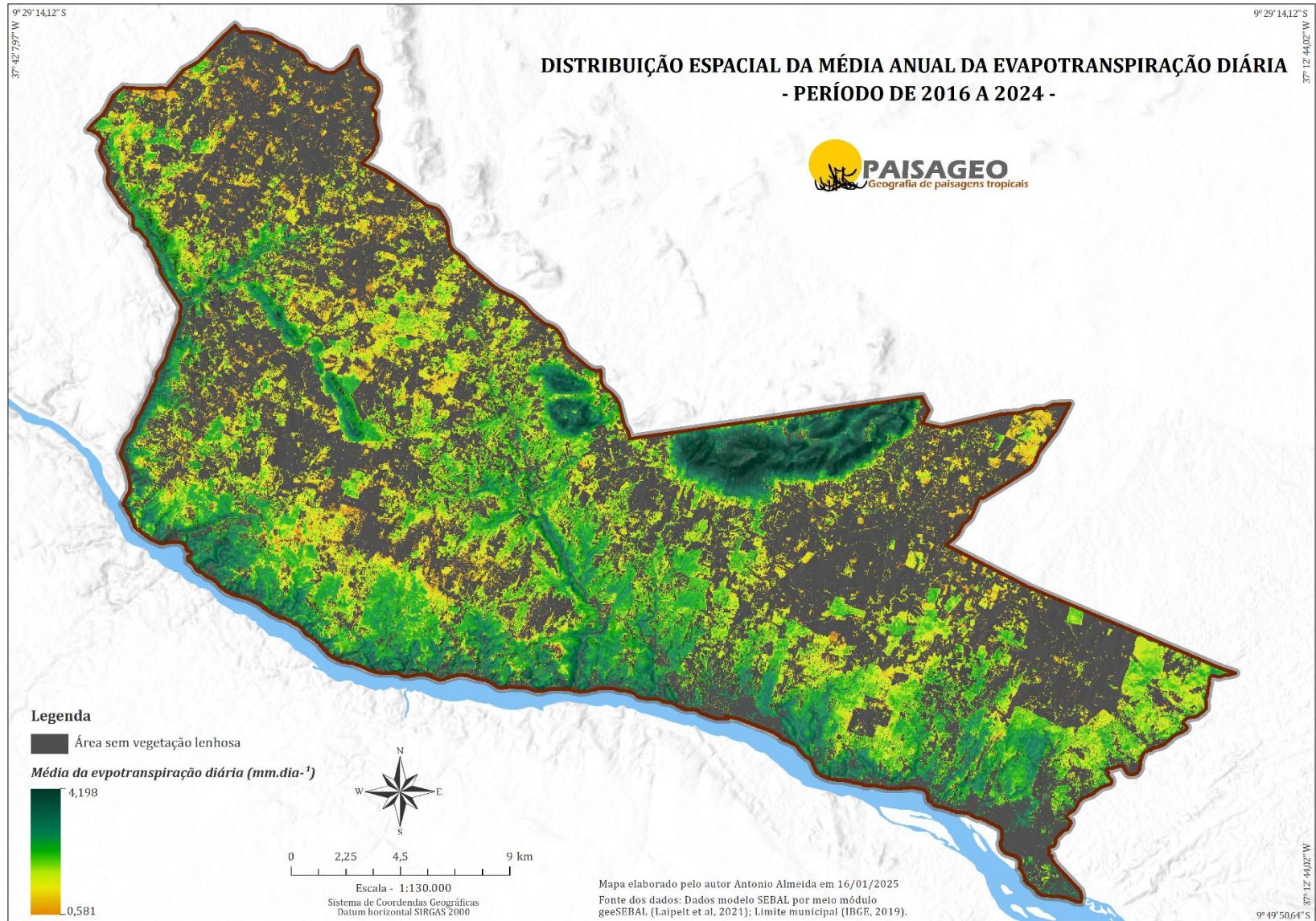
como a deficiência hídrica impacta na eficiência da água pela vegetação e pode ser intensificada pelos danos causados pelo homem.

Assim, a seguir é apresentada a distribuição espacial da média anual de evapotranspiração diária na Caatinga, variando de 0,581 a 4,198 mm.dia<sup>-1</sup>, durante o período 2016-2024. (**Figura 60**). As áreas com evapotranspiração mais elevadas correspondem àquelas associadas com vegetação densa e relativamente bem conservada, principalmente quando nas áreas de formações CAD, onde apresentam valores de evapotranspiração próximo das 4,198 mm.dia<sup>-1</sup>.

Em geral, as áreas nas cores em verde escuro existente no mapa correspondem a maior transpiração, sendo elas que apresentam maior densidade de cobertura vegetal e, desse modo, provavelmente uma considerável perda de água para a atmosfera. Tal padrão indica que áreas com alta densidade foliar, tais como a CAD, possuem um maior potencial de conservar a umidade e, assim, aumentar sua transpiração, apresentado uma adaptação eficiente quando associado à disponibilidade hídrica (MARQUES et al., 2020; MUTTI et al., 2019).

Em contraste, áreas com evapotranspiração mais baixa, exibidas em tons de amarelo, apresentam áreas mais abertas ou degradadas, indicando domínio de uma tipologia arbustiva, como a CArA. Nessas áreas, a menor densidade de cobertura vegetal e a exposição frequente do solo resultam em uma capacidade reduzida de transpiração, limitando a eficiência hídrica da vegetação (Mutti et al., 2019; Campos et al., 2019). Esse padrão de evapotranspirações mais baixas, com valor de aproximadamente 0,581 mm.dia<sup>-1</sup>, indica vulnerabilidade potencialmente alta aos processos de desertificação, principalmente durante grandes períodos de secas.

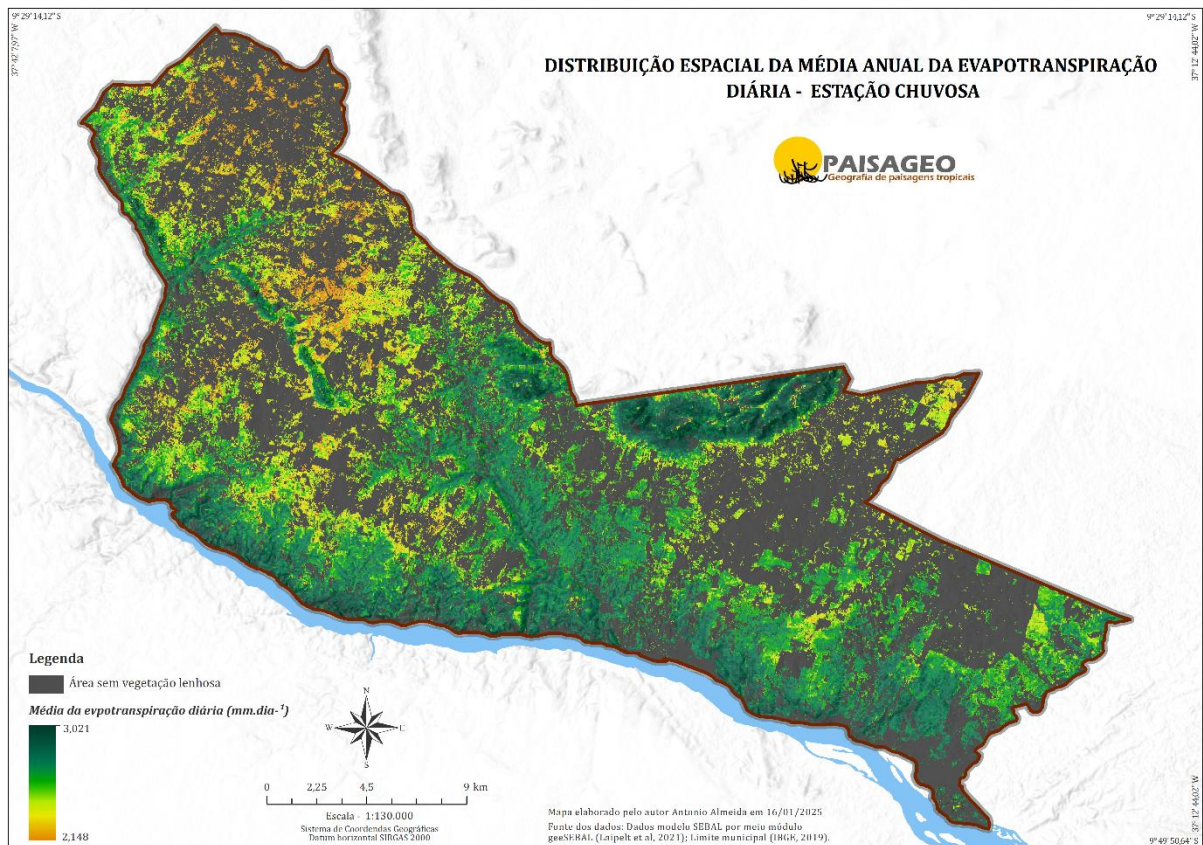
Figura 60 - Evapotranspiração Média Anual



Fonte: O autor

Outro fenômeno regular que se manifesta ao longo de todo o período considerado são as flutuações sazonais da evapotranspiração. Nos períodos chuvosos e secos, a relação da evapotranspiração com a RUE é direta. No caso de meses com alta precipitação, a evapotranspiração na maioria dos casos é mais moderada, no entanto, para as tipologias densas, por exemplo, CAD, varia de 2,148 a 3,021 mm.dia-1 (**Figura 61**). Nessas formações mais densas, a presença de uma estrutura foliar mais robusta permite observar uma evapotranspiração moderada mesmo em períodos chuvosos, refletindo desta maneira uma maior capacidade de uso da água.

Figura 61 - Evapotranspiração nos Meses chuvosos

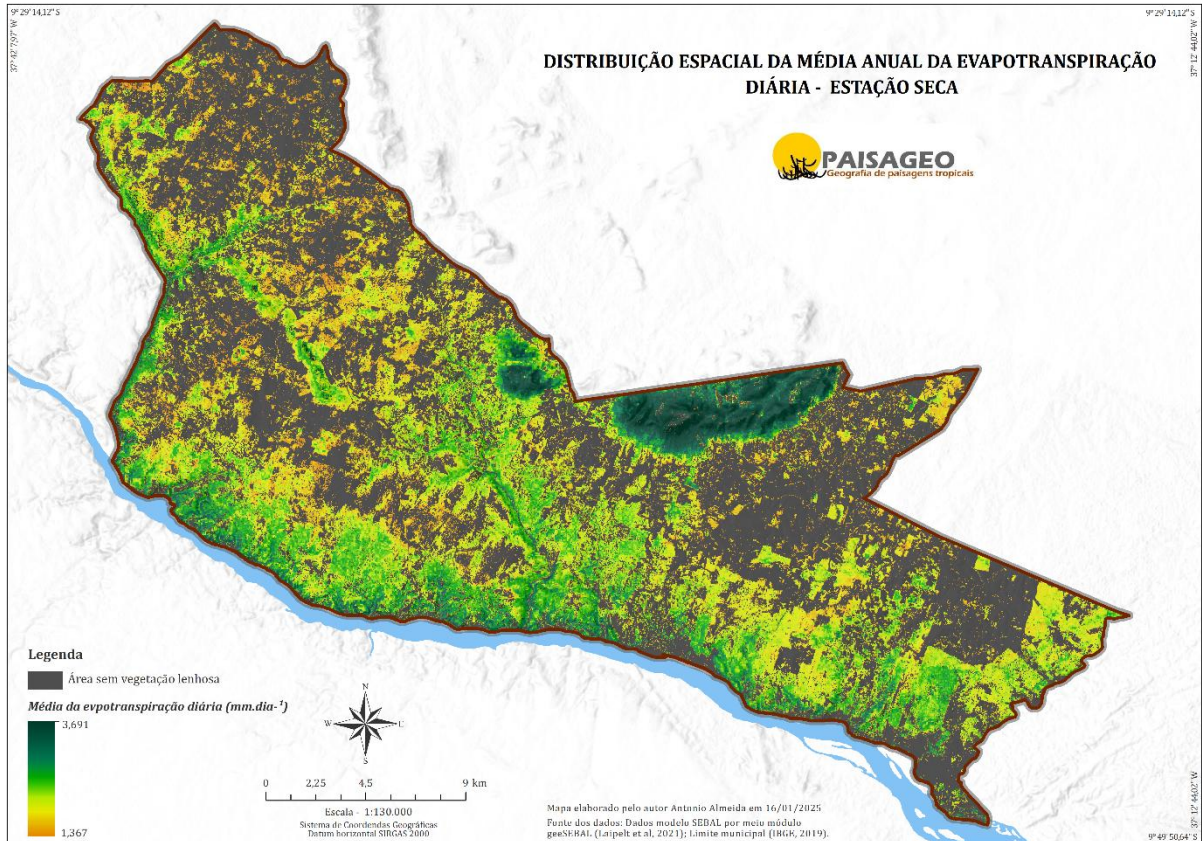


Fonte: O autor

Por outro lado, nos meses secos, quando a disponibilidade da água está amplamente disponível em combinação com grande quantidade de luz solar, a evapotranspiração em tipologia densa é relativamente alta, com valores que variam entre 1.367 a 3.691 mm. dia<sup>-1</sup> (**Figura 62**). Tal comportamento atesta a habilidade das áreas densas de manter uma estrutura foliar significativa mesmo em condições de seca, o que contribui para uma maior perda de água pela transpiração (Marques et al., 2020). Por outro lado, as formações mais abertas, como as

arbustivas (CArA e CArAA), exibem uma evapotranspiração mais homogênea e baixa durante o período seco, refletindo a menor densidade foliar e a limitação estrutural para reter umidade no solo.

Figura 62 - Evapotranspiração nos Meses secos

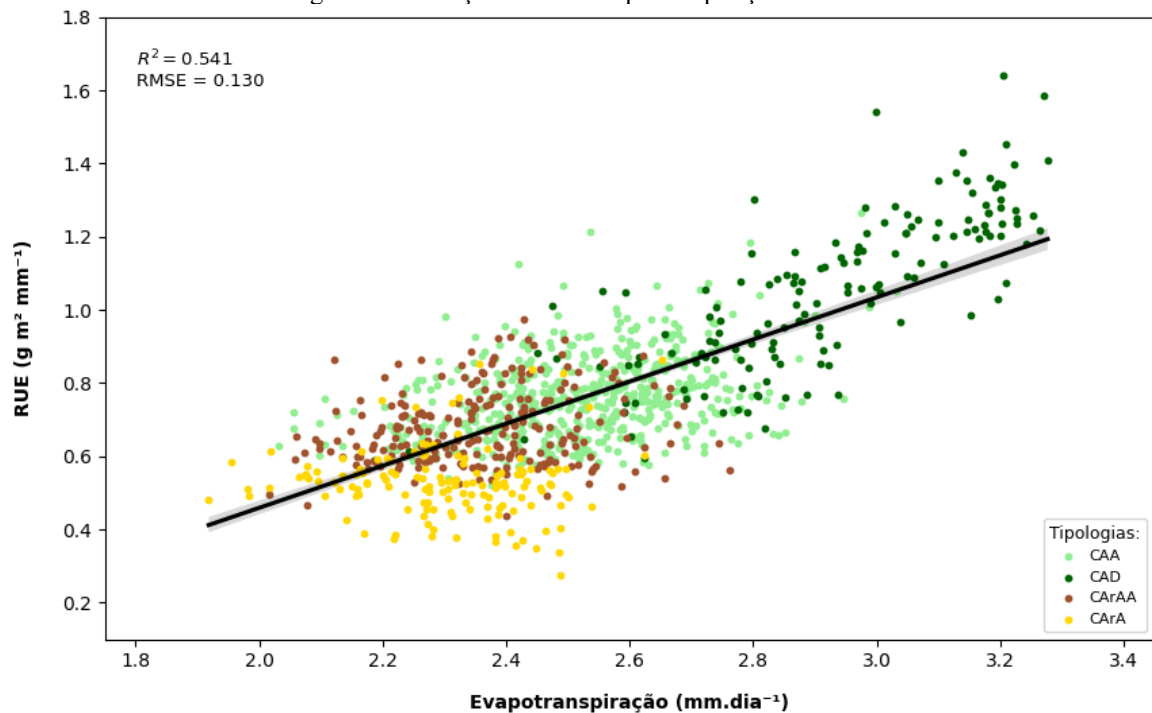


Fonte: O autor

A relação da evapotranspiração com a RUE nas tipologias da Caatinga também é ilustrada em um gráfico de dispersão na **Figura 63**. Com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,503, indica uma correlação de moderada a forte entre as variáveis. Além disso, a linha de tendência ascendente indica que maiores taxas de evapotranspiração estão associadas a valores mais elevados de RUE, o que sugere que as formações arbóreas densas são mais adaptadas a ambientes com maior disponibilidade hídrica e melhor capacidade de retenção de umidade. Em contraste, as tipologias arbustivas, que já apresentaram ser mais expostas e vulneráveis ao distúrbio da atividade humana, apresentam valores menores de RUE e evapotranspiração, o que evidencia a perda de biomassa e uma menor eficiência no uso da água.



Figura 63 - Relação entre a Evapotranspiração e a RUE



Fonte: O autor

Os padrões de evapotranspiração evidenciados pelas diferentes tipologias da Caatinga permitem compreender de modo geral as estratégias de uso da água pela vegetação. A CAD, com áreas de maior densidade foliar, mostra uma resposta eficiente às condições de variação hídrica, mantendo a transpiração alta e otimizando o uso da água disponível, mesmo em circunstâncias de seca. Em contrapartida, as tipologias mais abertas, apresentam evapotranspiração mais limitada e vulnerável a períodos de baixa disponibilidade hídrica, o que as torna mais suscetíveis a degradação.

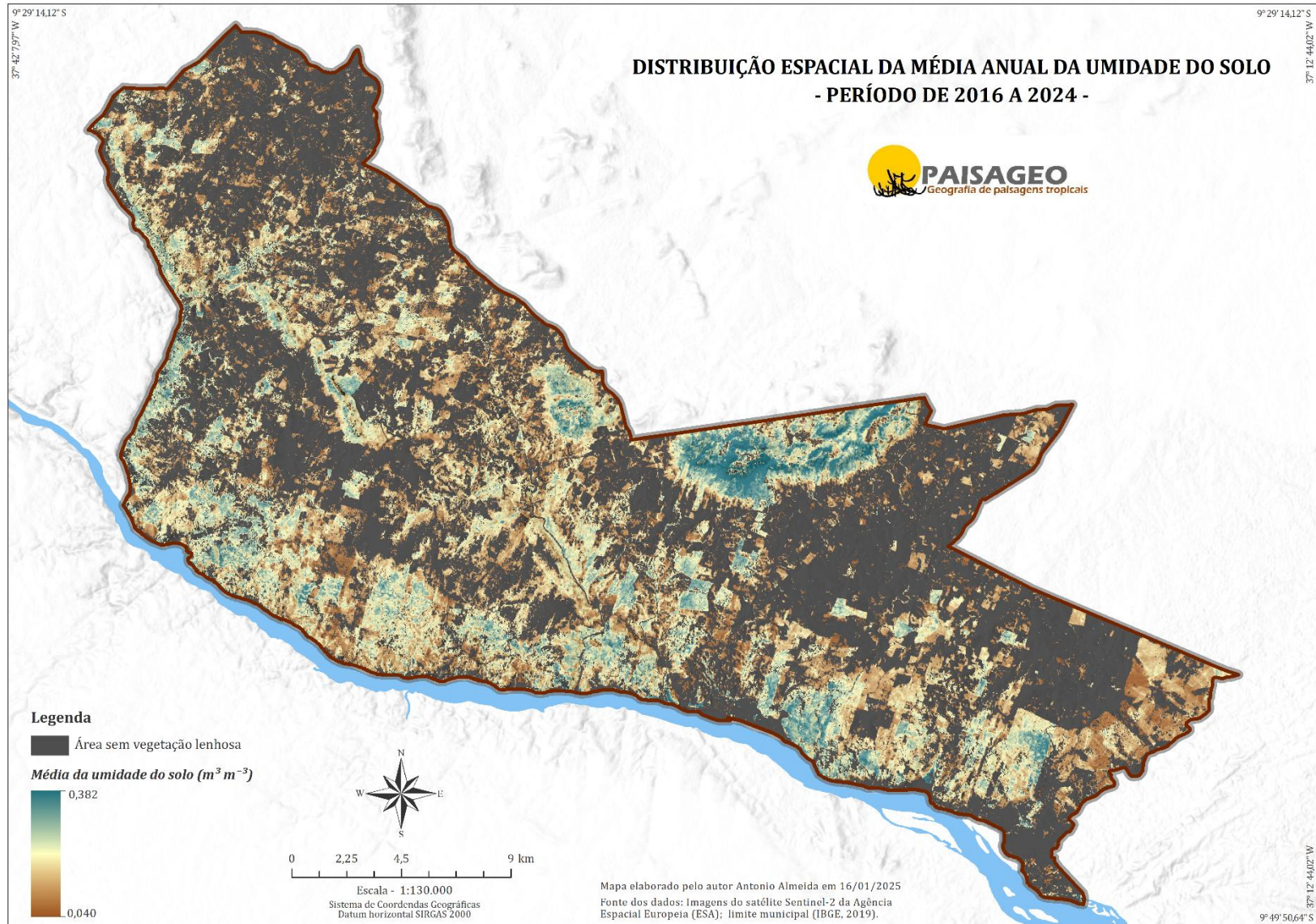
## 6.5 PADRÕES ESPACIAIS DA UMIDADE SUPERFICIAL DO SOLO (SSM) COMO VARIÁVEL DE SUPORTE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA CAATINGA

A Umidade Superficial do Solo (SSM) desempenha um papel crucial na modulação da RUE nas diferentes tipologias da Caatinga. Isso é comprovado por estudos que mostram que espécies arbóreas, como a CAD, conseguem reter mais umidade no solo (Jost et al., 2009; Demir et al., 2023; Tonello, 2021), especialmente durante os períodos chuvosos, o que permite uma RUE geralmente mais elevada. Isso se deve à maior densidade de cobertura vegetal, que reduz a evaporação direta do solo e aumenta a absorção de água (Guariguata e Ostertag, 2001).

Dando continuidade à análise da eficiência do uso da água pelas diferentes tipologias da Caatinga, é fundamental compreender como a disponibilidade hídrica no solo influencia diretamente a dinâmica produtiva da vegetação. Nesse sentido, A média anual da umidade do solo, ilustrada na **Figura 64**, apresenta valores variando entre 0,004 e 0,382 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, representando uma integração dos períodos seco e chuvoso e destacando as áreas com maior capacidade de retenção hídrica ao longo do ano.

Nota-se que as regiões de vegetação densa mantêm uma umidade média relativamente alta, o que se correlaciona positivamente com uma RUE elevada, indicando uma maior eficiência no uso da água ao longo do ano. Em contraste, as áreas arbustivas, como CArA, e as regiões perturbadas apresentam valores médios de umidade do solo mais baixos, refletindo a menor cobertura vegetal e a exposição frequente do solo.

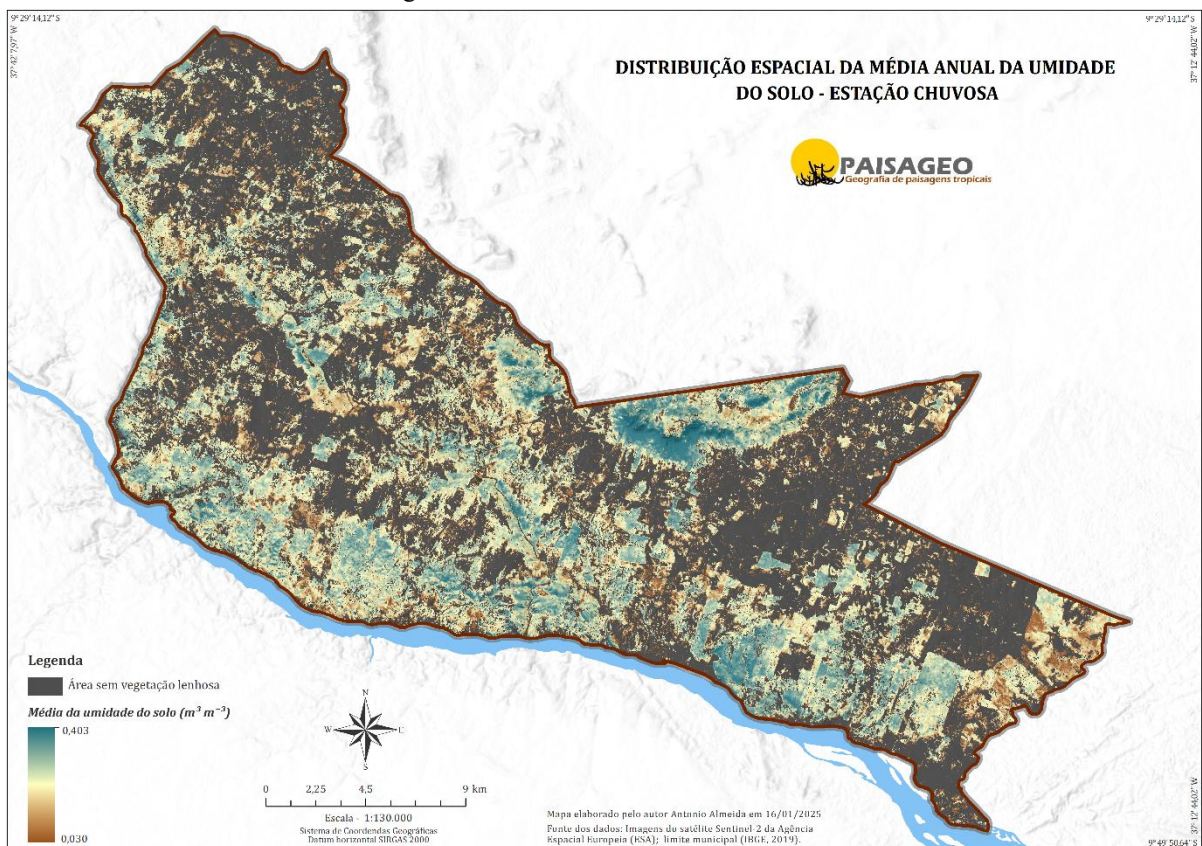
Figura 64 - Umidade do Solo Média Anual



Fonte: O autor

A visualização das variações sazonais dos padrões de SSM ao longo do período, nas diferentes tipologias, permite uma compreensão das mudanças da disponibilidade hídrica ao longo do ano, e como essa mudança compromete a eficiência hídrica e produtividade das formações vegetais, em particular, entre períodos chuvosos e secos. Nos períodos chuvosos, os valores de umidade do solo apresentam uma variação entre  $0,003$  e  $0,403 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , essas áreas com maiores índices umidade correspondem as tipologias associadas às maiores reservas hídricas, como a CAD, indicadas por tons de azul mais intenso (**Figura 65**).

Figura 65 - Umidade do Solo nos Meses Chuvosos

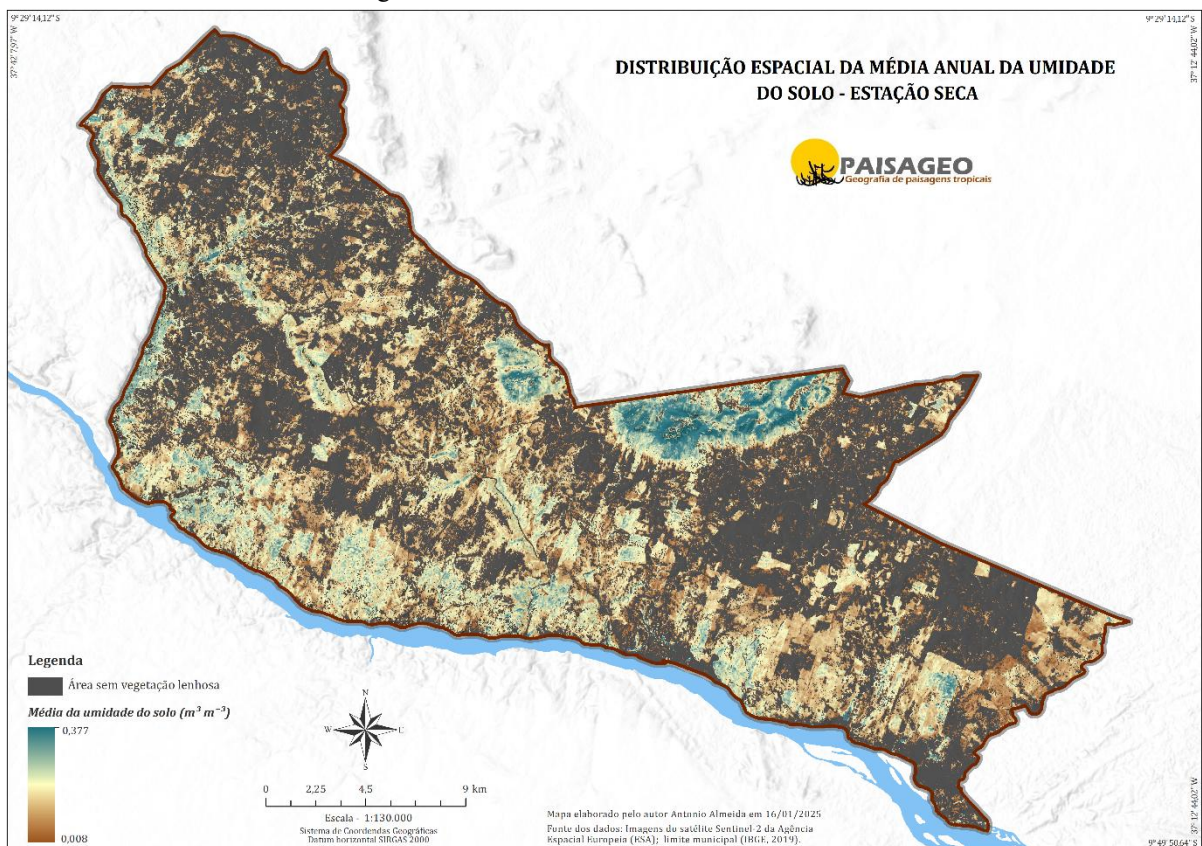


Fonte: O autor

Por outro lado, nas tipologias arbustivas e em áreas expostas a distúrbios, onde a capacidade de retenção hídrica é mais baixa (tonalidades marrons no mapa), indicam uma menor disponibilidade de água no solo, o que resulta em valores reduzidos de RUE. Esse padrão reflete uma menor umidade do solo, indicando que as tipologias arbustivas e as áreas afetadas por distúrbios são mais vulneráveis à escassez hídrica, especialmente em períodos de seca prolongada (Araujo et al., 2022).

No período seco (**Figura 66**), foi possível observar que a SSM reduz significativamente, variando entre  $0,008$  a  $0,377 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Nota-se que mesmo com redução, a CAD consegue manter níveis ainda relativamente superiores de SSM em comparação com as tipologias arbustivas, evidenciando-se por sua alta resiliência hídrica. Contudo, as tipologias arbustivas e as áreas de região perturbada apresentam níveis baixíssimos de umidade do solo, próximo do limite inferior,  $0,008 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , que compromete seriamente a RUE e limita a capacidade da vegetação de produzir biomassa durante o período seco.

Figura 66 - Umidade do Solo nos Meses Secos

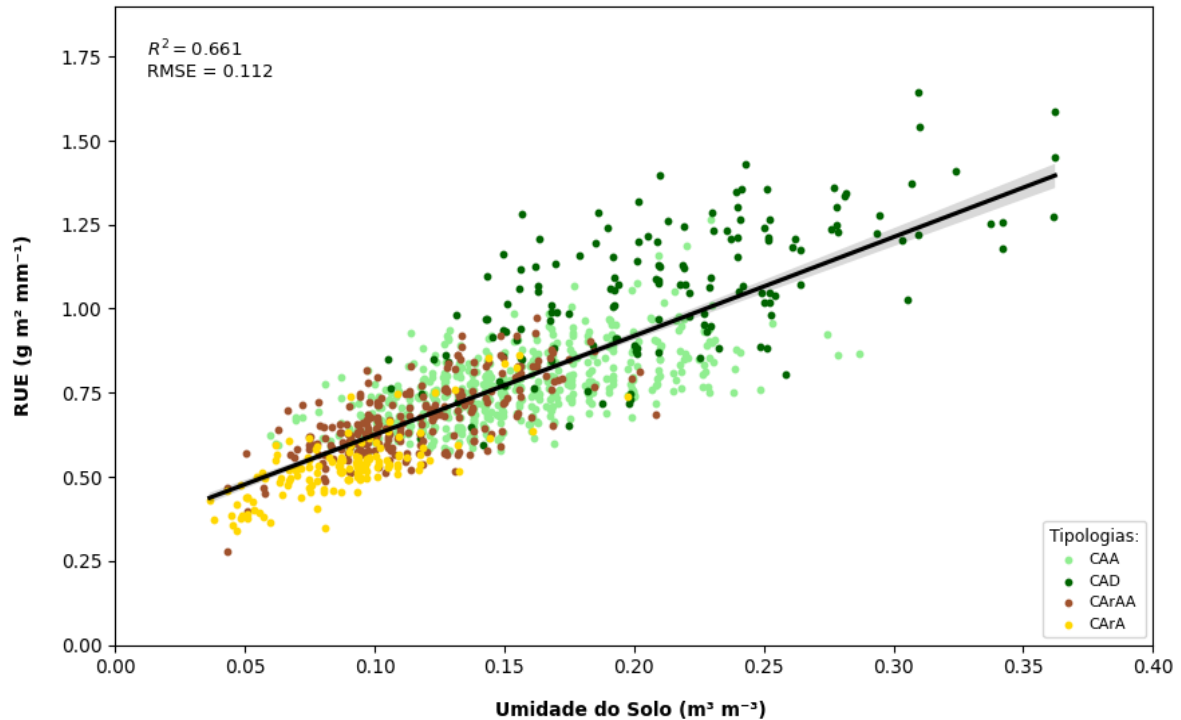


Fonte: O autor

Diante dos padrões espaciais e sazonais observados na umidade do solo e sua influência direta sobre a produtividade da vegetação, torna-se pertinente explorar de forma mais objetiva a relação entre essa variável e a RUE. Essa relação pode ser explorada por meio do gráfico de dispersão na **Figura 67**, onde mostra como essas variáveis se correlacionam nas diferentes tipologias da Caatinga. Com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de  $0,670$ , o gráfico indica uma correlação positiva forte, sugerindo que cerca de  $67\%$  da variação na RUE pode ser explicada pela umidade do solo. Isso demonstra que, conforme a umidade no solo aumenta, a

RUE tende a ser mais alta, especialmente em áreas de vegetação densa como a CAD, onde a estrutura vegetal contribui para uma retenção hídrica eficiente e, assim, para um uso otimizado da água disponível.

Figura 67 - Relação entre a RUE e a umidade do solo



Fonte: O autor

Em contrapartida, as áreas arbustivas e perturbadas, que apresentam menores níveis de umidade no solo, também tendem a exibir uma RUE reduzida. A limitação na capacidade de retenção de umidade nessas regiões, causada por distúrbios antrópicos, compromete a eficiência da vegetação em absorver e utilizar a água de forma eficaz. Dessa forma, o gráfico confirma que a umidade do solo é um fator crucial para a eficiência hídrica na Caatinga, evidenciando a maior resiliência das tipologias arbóreas em comparação com as formações arbustivas.

## 6.6 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (LST) E SUA RELAÇÃO COM EFICIÊNCIA HÍDRICA DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA

A Temperatura da Superfície Terrestre (LST) na Caatinga apresenta grande variação, oscilando entre 27,27 °C e 47,61 °C, com um padrão espacial fortemente influenciado pela umidade do solo e pelas diferentes tipologias vegetais (**Figura 68**). A análise mostra um contraste claro entre áreas de alta e baixa umidade do solo (ver mapas), evidenciando assim,

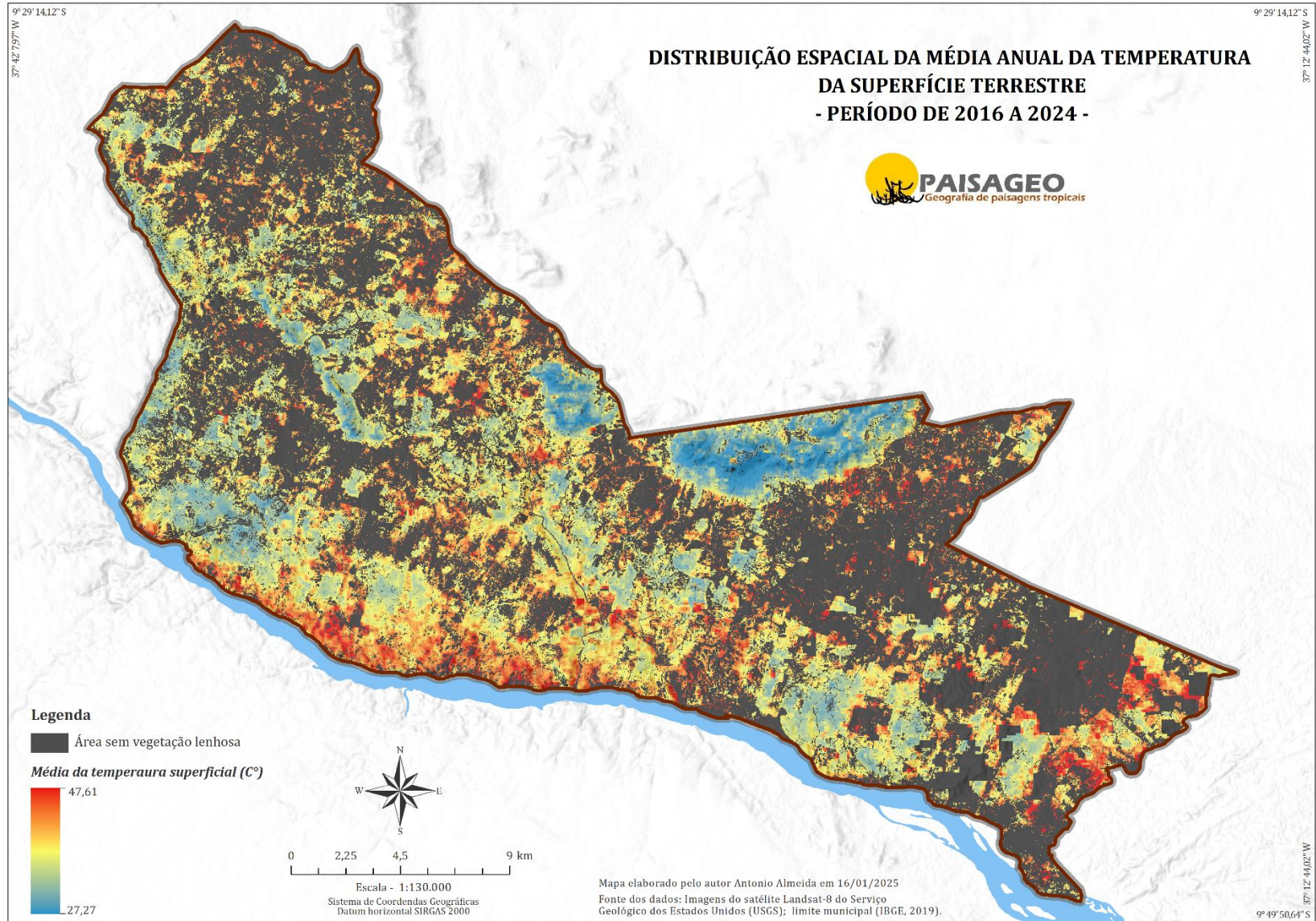
como a estrutura e densidade da vegetação influenciam tanto a retenção hídrica quanto a regulação térmica do solo. De uma maneira geral, é possível observar que, devido ao aumento da retenção hídrica no solo, as formações arbóreas densas apresentam LST mais baixas do que outras mais abertas.

Nessas regiões, devido à densa cobertura vegetal que sombreia o solo, a taxa de evaporação do solo é reduzida, mantendo a umidade do solo relativamente alta (Guariguata e Ostertag, 2001), o que produz uma temperatura média de cerca de 34°C. A alta umidade e temperaturas mais baixas nesse ambiente contribuem para uma RUE de forma mais eficiente para a transpiração e a produção de biomassa.

Contudo, as áreas que apresentam alta temperatura, visualizadas em vermelho e laranja nos mapas de distribuição da LST, são indicadores de baixa umidade do solo e, portanto, de formações arbustivas e regiões degradadas. Esses locais indicam temperaturas médias em torno de 38 °C, onde a exposição direta do solo à radiação solar aumenta a LST, pois a umidade do solo é perdida por conta da vegetação, tornando-se menos eficiente no uso da água (Seneviratne, et al., 2010; Guilherme et al., 2022).

A combinação de alta temperatura superficial e baixa umidade do solo, sugere uma diminuição nos valores da RUE, pois a vegetação sofre mais estresse hídrico, o que acaba dificultando o processo de transpiração, e desta forma reduzindo a produção de biomassa (Green et al., 2022; Holzman et al., 2014). Assim, essa associação, por sua vez, torna-se relevante para entender como o fortalecimento da estrutura da vegetação lenhosa e a perturbação humana moldam os padrões hídricos e térmicos da vegetação lenhosa da caatinga.

Figura 68 - Temperatura da Superfície Média Anual

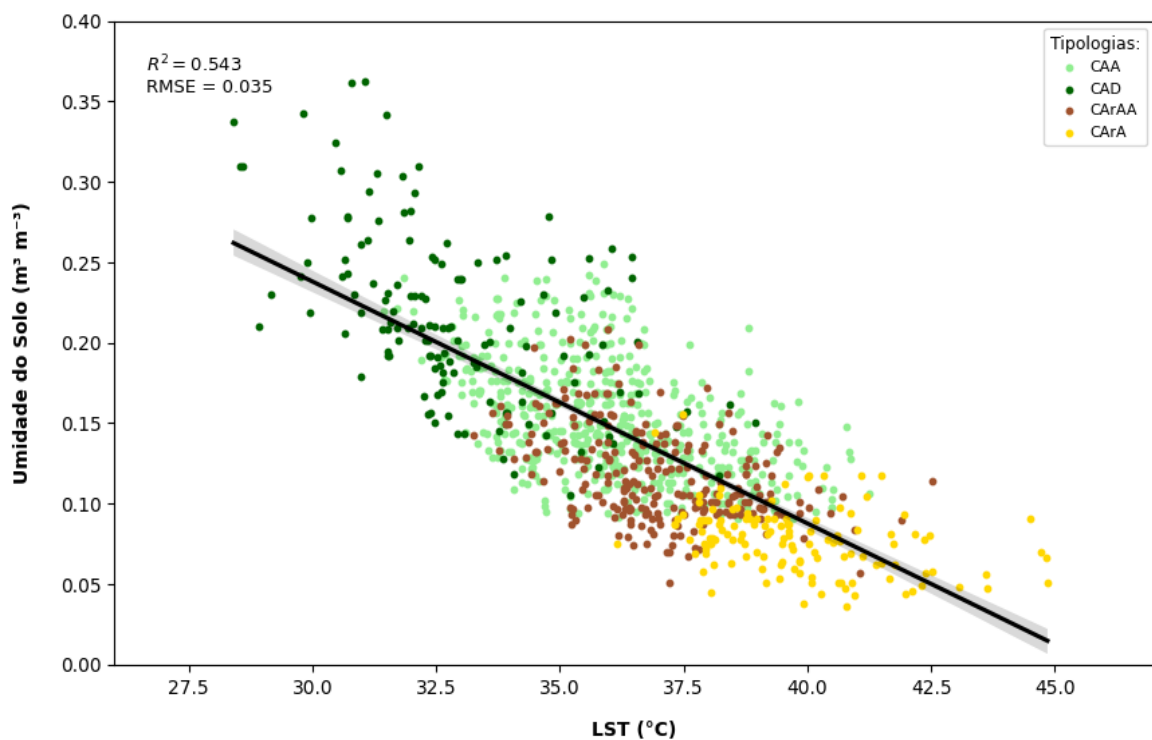


Fonte: O autor



A seguir é possível observar essa relação negativa para ambos os parâmetros, com um  $R^2$  de 0,543 (**Figura 69**). Ou seja, de modo mais simples, 54,3% da variação na LST é explicada pela umidade do solo. Vários autores (Zang et al., 2014; Cao e Sanchez-Azofeifa, 2017; Ellison et al., 2017) mostram que essa relação é particularmente forte nas áreas de maior cobertura vegetal, uma vez que, a maior umidade do solo contribui para a estabilização do microclima local, reduzindo a temperatura da superfície e criando condições mais favoráveis ao desenvolvimento da vegetação.

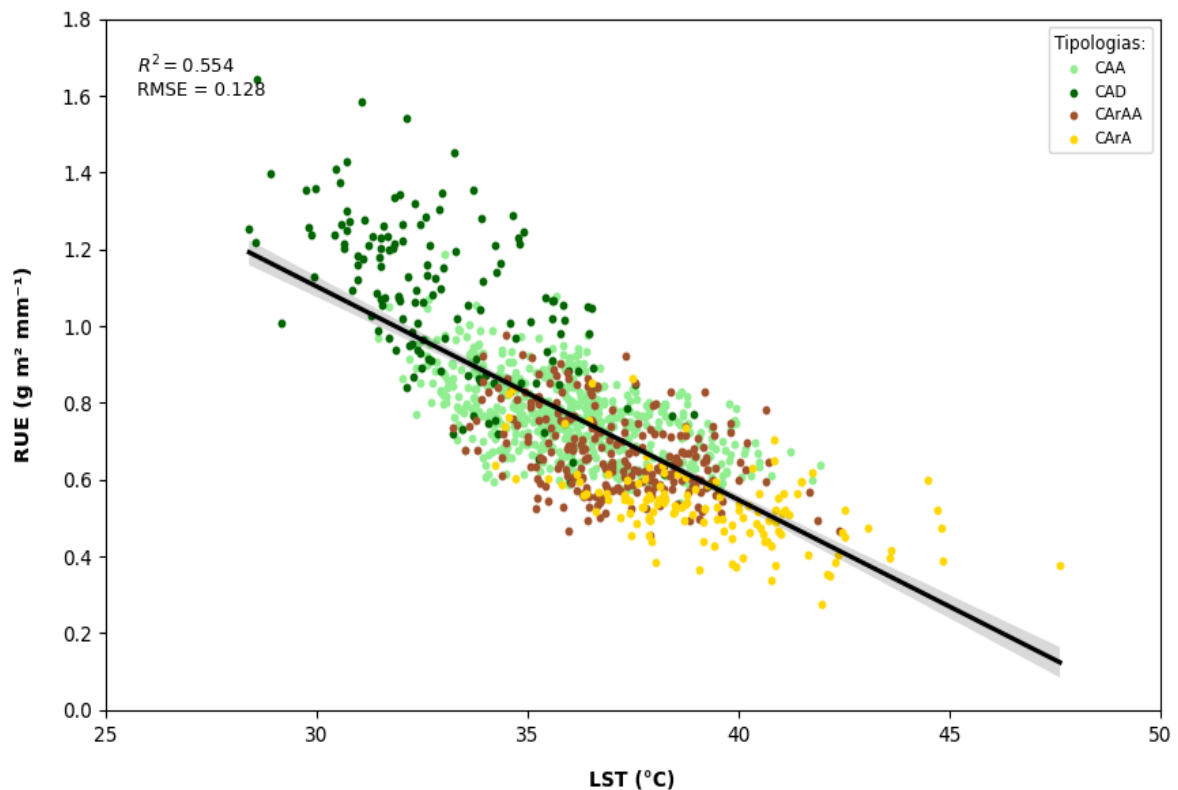
Figura 69 - Relação entre a umidade do solo na zona radicular e a LST



Fonte: O autor

Além disso, a **Figura 70** apresenta a relação entre LST e RUE, revelando outra correlação negativa, com  $R^2$  de 0,554, indicando que cerca de 55,4% da variação na RUE é explicada pela LST. Esse padrão implica que as áreas com LST mais baixa tendem a ter uma RUE mais alta, enquanto as áreas com temperaturas mais elevadas possuem menor eficiência hídrica. Esse comportamento é explicado pela disponibilidade de umidade e pela capacidade da vegetação de regular a transpiração em função da temperatura (Seneviratne et al., 2010; Schwingshackl et al., 2017).

Figura 70 - Relação entre a RUE e a LST



Fonte: O autor

Nas áreas com maior cobertura vegetal, como em tipologias arbóreas, a temperatura radiativa registrada por sensores se aproxima mais da temperatura do dossel no máximo da vegetação espectral ou na cobertura completa do dossel (Goward et al., 2002). Isso resulta em uma RUE mais elevada, pois áreas com maior cobertura vegetal e sombreamento apresentam LST mais baixa, favorecendo o aproveitamento da água disponível pela vegetação (Ellison et al., 2017; Hesslerová et al., 2013).

Em contrapartida, as tipologias de porte arbustivo localizadas em áreas perturbadas, caracterizadas por baixa umidade do solo e LST elevada, apresentaram uma redução significativa na RUE. Essas tipologias possuem baixo índice de cobertura vegetal e, mesmo quando não submetidas a distúrbios antrópicos, mantêm uma vegetação esparsa, o que aumenta a exposição direta à radiação solar e intensifica o estresse hídrico e térmico. Essa combinação de fatores diminui a capacidade da vegetação de utilizar a água eficazmente e contribui para uma maior vulnerabilidade dessas regiões às condições de secas e variação térmica. (Feldman et al., 2023).

Como as relações observadas entre LST, umidade do solo, e RUE indicam, a estrutura vegetativa está intimamente ligada à eficiência hídrica na Caatinga, em parte graças à

capacidade reguladora e estabilizadora do microclima oferecido por mecanismos biofísicos como evaporação, transpiração e sombreamento (TERSCHANSKI et al., 2024). De fato, as tipologias com maior densidade foliar, mostram uma maior capacidade de responder às variações climáticas mantendo quantidades mais estáveis de umidade do solo em altas temperaturas. Assim sustentam uma RUE maior. No entanto, tipologias arbustivas e degradadas como aquelas localizadas sob alta radiação solar constante mostram uma maior LST e menor umidade do solo, dificultando o uso eficiente da água e diminuindo a resiliência da vegetação a períodos de seca prolongada.

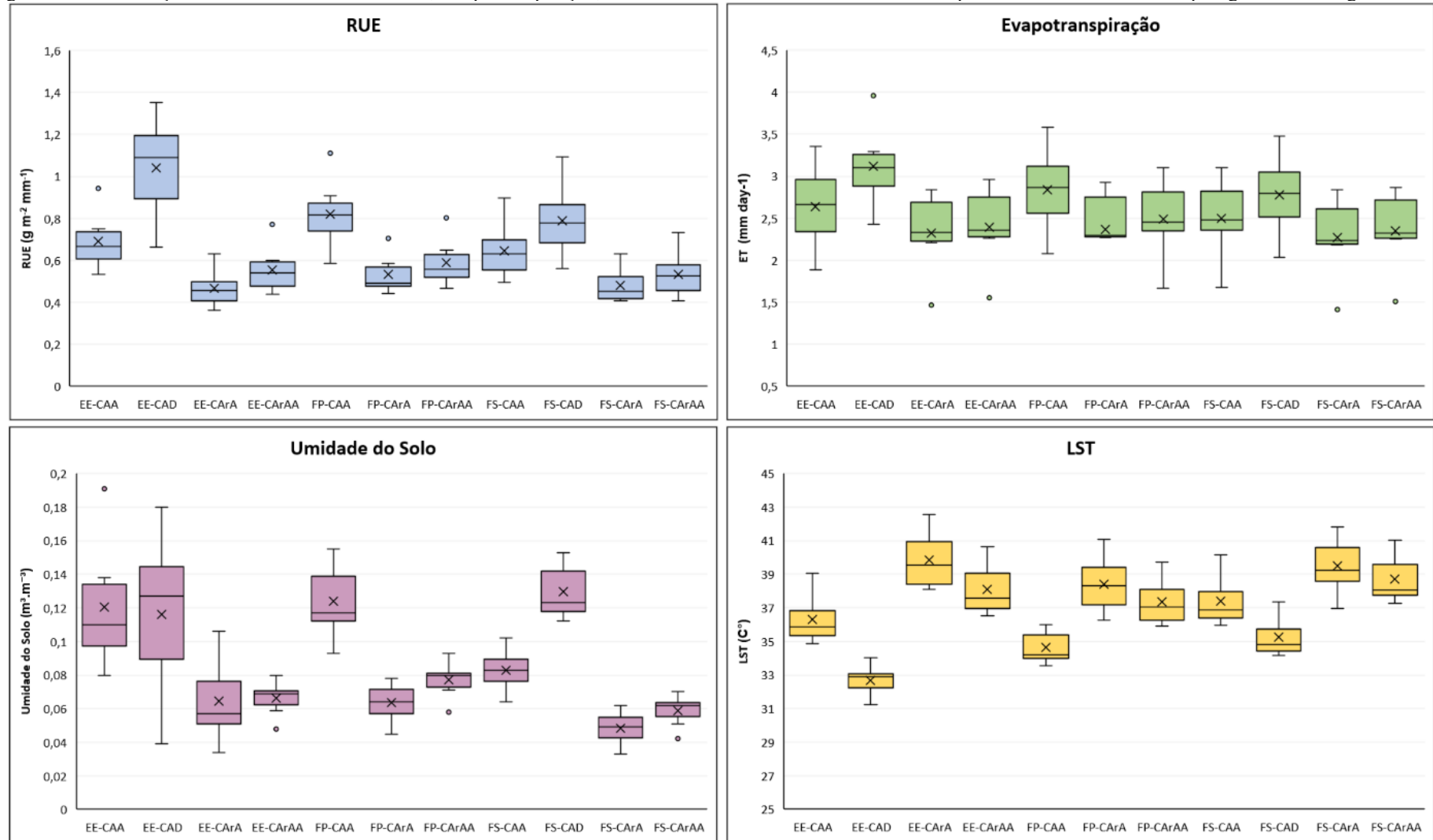
## 6.7 DINÂMICAS DAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA EM RESPOSTA ÀS VARIÁVEIS DE PRODUTIVIDADE HÍDRICA

A comparação unificada dessas dinâmicas entre as tipologias da Caatinga com referência à eficiência no uso da água (RUE), evapotranspiração (ET), Umidade do Solo (SSM) e a temperatura de superfície (LST), destaca quão crucial é o porte da vegetação, entre as formações arbóreas e arbustivas, para a resiliência ecológica e a adaptabilidade às alterações quanto os distúrbios antrópicos. Ambas tipologias expressaram respostas diretas às variáveis hidrológicas, onde a absorção de água pelas raízes exerce um papel crucial na dinâmica de crescimento da vegetação, por meio de pulsos efêmeros de água, característicos do regime pluviométrico da região (ALMEIDA et al., 2019; Pinheiro et al., 2013).

Em suma, as tipologias arbóreas (CAD e CAA), possibilitam uma significativa vantagem em termos de uso da água e regulação térmica, enquanto as tipologias arbustivas, CArA e CArAA, parecem ser mais afetadas pela mudança nas variáveis ambientais, bem como pelas pressões associadas aos distúrbios antrópicos (**Figura 71**).

Em condições e estado estabilizado, as tipologias arbóreas apresentam uma alta eficiência hídrica (RUE), especialmente CAD, com uma média de  $1,04 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ , a CAA também manteve um ótimo valor de  $1,69 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ . Essa alta eficiência no uso da água é corroborada pela elevada evapotranspiração, que na CAD atinge valores médios de  $3 \text{ mm.dia}^{-1}$  e na CAA cerca de  $2,6 \text{ mm.dia}^{-1}$ , refletindo a capacidade das formações arbóreas de sustentar a transpiração e o uso eficiente da água, aproveitando ao máximo a disponibilidade hídrica no semiárido.

Figura 71 - Distribuição dos valores médios do RUE, Evapotranspiração, umidade do solo na zona radicular e LST por Estados Dinâmicos e Tipologias da Caatinga



Legenda: CArA - Caatinga Arbustiva aberta; CAA – Caatinga Arbórea Aberta; CAD – Caatinga Arbórea Densa; CArAA – Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta; FS- Formado por Sucessão; EE – Estado Estabilizado; FP – Formado por Perturbação. Fonte: O autor

No que se refere à umidade do solo, a estrutura da vegetação arbórea densa desponta uma maior retenção hídrica, onde as médias de US próximas a  $0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  na CAD. A umidade do solo assume papel primordial na geração de microclimas mais amenos visto a diminuição da amplitude térmica, notadamente em períodos de clima quente e seco. A retenção hídrica possibilita a manutenção da estabilidade do solo, redução das perdas de água do solo e aumento da resiliência da vegetação em condições adversas como a seca (Terschanski et al., 2024).

Assim sendo, a LST, nas tipologias arbóreas, se mantém, ainda que moderada, com  $32^\circ\text{C}$  na CAD e  $36^\circ\text{C}$  na CAA, o que confirma a adequada capacidade dessas formações a proteger o solo da insolação direta e evitar a excessiva evaporação, se mostrando mais resilientes termicamente. Formações vegetais mais densas, como as tipologias arbóreas, desempenham um papel crucial na regulação térmica e na proteção do solo contra a radiação solar direta, minimizando a evaporação excessiva e favorecendo a retenção hídrica (Rodríguez-Iturbe, 2000).

Por outro lado, as tipologias arbustivas em estado estabilizado, como a CArA e a CArAA, apresentam uma RUE consideravelmente menor, com valores médios abaixo de  $0,6 \text{ g m}^2 \text{ mm}^{-1}$ , o que reflete uma limitação na capacidade de utilizar eficientemente a água disponível (Le Houérou, 1984). A evapotranspiração nessas tipologias é mais baixa, em torno de  $2,4 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , demonstrando uma capacidade reduzida de transpiração e uso hídrico. Esse comportamento está alinhado com os baixos níveis de umidade do solo, que apresentam médias de apenas  $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , indicando uma limitação na retenção hídrica e uma maior vulnerabilidade a períodos de seca. As temperaturas de superfície (LST) são fortemente influenciadas pela densidade da vegetação, com áreas menos densas apresentando maior exposição ao estresse térmico e hídrico (Rodríguez-Iturbe, 2000). A LST nas formações arbustivas em estabilidade é notavelmente mais alta, como  $38^\circ\text{C}$  na CArAA e  $39^\circ\text{C}$  na CArA, evidenciando que a exposição do solo nessas áreas aumenta a absorção de calor, comprometendo a regulação térmica e a proteção hídrica.

A influência das perturbações antrópicas intensifica essas diferenças, especialmente nas tipologias arbustivas (Araujo et al., 2023; Rito et al., 2017; Sfair et al., 2018). Para as formações arbóreas em estado formado por perturbação, observa-se uma leve redução na RUE, com a CAA passando para cerca de  $0,82 \text{ g m}^2 \text{ mm}^{-1}$ , embora ainda mantenha uma eficiência hídrica razoável. A evapotranspiração nas áreas perturbadas de CAD e CAA reduz-se para valores médios próximos de  $2,5 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , refletindo uma leve perda na capacidade de transpiração,

mas com uma estabilidade que permite às tipologias arbóreas preservar certa funcionalidade hídrica.

A umidade do solo também diminui nesses locais, com cerca de  $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , mas ainda é suficiente para reter água e mitigar os impactos da seca. A LST para as áreas arbóreas perturbadas aumenta, em comparação às condições de estabilidade, mas permanecem em níveis bastante baixos. Isso sugere que essas tipologias continuam a reduzir a temperatura do solo, mesmo em cenários de distúrbio.

As tipologias arbustivas sob perturbações reduzem a RUE ainda mais, para cerca de  $0,5 \text{ g m}^2 \text{ mm}^{-1}$ , revelando uma baixa eficiência no uso da água e uma limitação na capacidade de resposta hídrica. Desta forma, a ET também diminui com valores abaixo de  $2,4 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , indicando declínio significativo na transpiração e no uso da água. A umidade do solo nas áreas arbustivas perturbadas diminui para cerca de  $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , agravando a vulnerabilidade hídrica e comprometendo a capacidade de resposta durante períodos de seca. Esse cenário de baixa retenção hídrica reflete-se na LST, que se eleva para valores de até  $41^\circ\text{C}$  na CArA, reforçando a exposição e o aquecimento excessivo do solo, condições que acentuam a vulnerabilidade das formações arbustivas e elevam o risco de desertificação em áreas de perturbação contínua (Maestre et al., 2012; Evans e Geerken, 2004).

No estado formado por sucessão, as tipologias arbóreas revelam um potencial de recuperação que se traduz em uma leve melhora na RUE e nos parâmetros hídricos e térmicos. Por exemplo, a CAD apresenta uma RUE média de  $0,79 \text{ g m}^2 \text{ mm}^{-1}$ , a ET em torno  $2,4 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  e umidade do solo de  $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , todos indicando uma capacidade de recuperação moderada, em termos de eficiência hídrica e retenção de água. A LST nas áreas arbóreas em sucessão permanece relativamente baixa com temperaturas a variar entre  $35^\circ\text{C}$  e  $37^\circ\text{C}$ , sinalizando que ainda se recuperam parcialmente da proteção térmica e resiliência hídrica, importante para a restauração ecológica, após distúrbios.

As tipologias arbustivas em sucessão, no entanto, apresentam recuperação limitada e mais lenta. A RUE média é baixa, em torno de  $0,5 \text{ g m}^2 \text{ mm}^{-1}$ , e a evapotranspiração em torno de  $2,2 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ , indicando uma dificuldade contínua em restaurar a eficiência hídrica. A umidade do solo permanece baixa, abrangendo valores médios de  $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  e prejudicando a capacidade destas áreas de reter água suficiente para permitir a regeneração. A LST nas áreas arbustivas em sucessão ainda é alta, com médias em torno de  $38^\circ\text{C}$  a  $39^\circ\text{C}$ . Sugerindo, assim, enquanto se recuperam, essas tipologias arbustivas ainda enfrentam desafios significativos para restaurar a moderação térmica e a eficiência hídrica.

Com essas observações, fica claro que as tipologias da Caatinga arbóreas desempenham um papel vital na resiliência hídrica e térmica do bioma, mesmo quando submetidas ao uso antrópico. Graças à estrutura mais densa, estas tipologias demonstram RUE mais alto, evapotranspiração ativa que sustenta o ciclo hídrico, uma retenção mais eficaz da umidade no solo e a regulação térmica, minimizando o aquecimento superficial. Em contrapartida, as tipologias arbustivas, devido à sua menor densidade, apresentam uma recuperação mais lenta e vulnerável em resposta a distúrbios, refletindo uma menor resiliência hídrica e térmica.

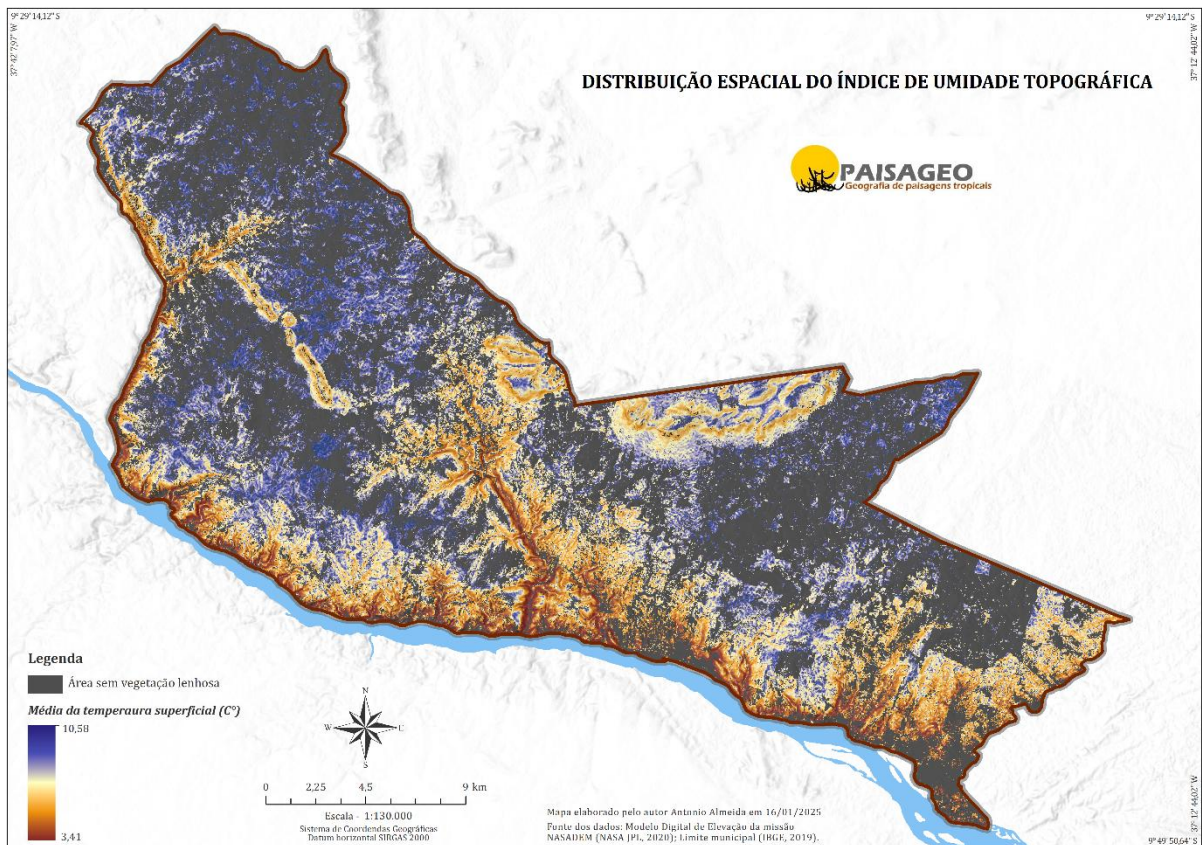
## 6.8 PADRÕES ESPACIAIS DO ÍNDICE DE UMIDADE TOPOGRÁFICA (TWI) E SUA REALAÇÃO INDICATIVA DE ESTABILIDADE DAS TIPOLOGIAS DA CAATINGA

A análise da distribuição espacial do Índice de Umidade Topográfica (TWI) na vegetação lenhosa da Caatinga, conforme representado no mapa a seguir (**Figura 72**), oferece uma compreensão sobre a estabilidade das tipologias vegetais sob condições de perturbação antrópica.

Reconhecido por diversos autores, o TWI, é um índice ideal para medir a capacidade de uma determinada área de acumular e reter água, importante para caracterizar a resiliência da vegetação, sobretudo, em regiões semiáridas (Raduła et al., 2018; Kopecký et al., 2021; Yang et al., 2015; Fernandes et al., 2021). No entanto, chama atenção que nas áreas que apresentavam maiores valores de TWI, presumidamente favoráveis para a propagação de formações arbóreas mais densas, como a CAD, foram detectadas formações vegetais majoritariamente arbustivas (CArA).

Na figura acima, áreas de altos valores de TWI, variando de 6,0 a 10,58, em tons de azul-escuro, estão geralmente localizados em baixadas e zonas de acúmulo de água, onde a umidade do solo é naturalmente mais alta. Contudo, a presença predominante de vegetação arbustiva e o estado de perturbação frequente sugerem que a capacidade dessas áreas de sustentar formações mais arbóreas e densas, é limitada pela ação humana, como desmatamento e pastoreio (Araujo et al., 2023; Sfair et al., 2018). Esses distúrbios antrópicos constantes impedem a retenção de umidade, o crescimento da biomassa e otimização da RUE, o que impede a evolução da vegetação para formações arbóreas mais densas e estáveis.

Figura 72 - Distribuição espacial do TWI



Fonte: O autor

Em contrapartida, nas áreas de baixo valor de TWI que variam entre 3,41 e 5,0, em tons de marrom, a menor capacidade hídrica de retenção é evidente nas regiões predominantemente localizadas nas encostas residuais do relevo e vales estruturais. Paradoxalmente, elas também exibem na maior parte de suas extensões a presença de vegetação arbórea. Na verdade, essa aparente contradição se deve às adaptações hidrológicas das espécies, que se desenvolvem bem em áreas de drenagem rápida e baixa saturação hídrica, compatíveis com o gradiente de declividade (QIN et al., 2009). Ademais, essas áreas, por dificuldades de acesso, sofrem menor interferência antrópica, favorecendo a manutenção do porte arbóreo e menos exposta a impactos diretos, conferindo maior estabilidade a essa tipologia.

### 6.8.1 Análise do TWI na Persistência de Tipológicas na Vegetação da Caatinga

A presença persistente da Caatinga Arbórea Aberta (CAA) em áreas com baixos valores de Índice Topográfico de Umidade (TWI) levanta um paradoxo ecológico interessante (Figura 73). Em princípio, esperava-se que essas regiões não favorecessem a manutenção de uma



vegetação arbórea mais densa, pois apresentam características ambientais desafiadoras, como baixa capacidade de retenção hídrica, alta evapotranspiração diária, baixa eficiência do uso da chuva (RUE), baixos níveis de umidade do solo e altas temperaturas da superfície (LST). Esses fatores indicam um ambiente de baixa disponibilidade hídrica e intensa perda de umidade, o que, teoricamente, dificultaria a permanência de uma tipologia arbórea.

Figura 73 - Exemplo de áreas em persistência da tipologia CAA em área de baixos valores de TWI



No entanto, a persistência da CAA nessas áreas pode ser explicada por uma combinação de fatores ecológicos e antrópicos. Do ponto de vista ecológico, a CAA apresenta uma cobertura vegetal mais aberta, permitindo maior exposição do solo à radiação solar, o que leva a um aquecimento superficial intenso. Isso resulta em maior evapotranspiração, pois a água disponível no solo evapora rapidamente devido à alta radiação, reduzindo a umidade disponível para as plantas. Além disso, esse processo cria um ciclo de umidade menos eficiente, uma vez que o solo perde água mais rápido do que consegue reter ou recarregar, dificultando o armazenamento hídrico. Como consequência, a eficiência no uso da água também é reduzida, pois, mesmo quando há disponibilidade hídrica, a vegetação não consegue aproveitá-la de forma eficiente para crescimento e produção de biomassa (Lozano-Parra et al., 2018; Corradini, 2014).

Além das limitações ecológicas, a ação antrópica também contribui para a permanência da CAA em um estado aberto e pouco denso. O desmatamento seletivo reduz a densidade da

vegetação ao remover árvores maiores, dificultando a regeneração natural e mantendo a área em um estágio ralo e degradado. O pastoreio intensivo, por sua vez, compromete ainda mais esse processo, pois a presença contínua de animais herbívoros, como gado e caprinos, impede o crescimento de novas mudas, perpetuando a condição de vegetação aberta. O efeito combinado dessas perturbações impede a formação de uma cobertura vegetal mais densa, reduzindo a retenção de umidade no solo e favorecendo a manutenção de um ambiente com baixa biomassa.

Dessa forma, a persistência da CAA em áreas com baixo TWI pode ser explicada pela interação entre processos ecológicos e impactos antrópicos. Enquanto fatores ambientais como alta evapotranspiração e baixa retenção hídrica dificultam o desenvolvimento de uma vegetação mais densa, as perturbações humanas reforçam essa tendência ao limitar a regeneração natural. Assim, essas áreas permanecem em um estado de baixa biomassa e estrutura aberta, sem alcançar uma fisionomia mais densa da Caatinga.

## 6.9 CONCLUSÃO

Neste capítulo, revelou como as perturbações antrópicas impactam a estrutura, funcionalidade ecológica e a capacidade da produtividade hídrica da vegetação. A principal afirmação é que essas perturbações, incluindo desmatamento, pastoreio intensivo e manejo inadequado, produzem mudanças persistentes que variam entre regressões a estados vegetativos simplificados e avanços para formações mais complexas, dependendo da intensidade e da frequência dos distúrbios.

A comparação das tipologias indica que as formações arbóreas possuem maior capacidade de retenção hídrica no solo, maior eficiência no uso da chuva (RUE) e maior resiliência aos impactos externos. Com valores elevados de produtividade hídrica, essas formações mantêm a eficiência e a recuperação mesmo em condições adversas, indicando a importância da regulação do ciclo hídrico regional. Ao contrário, a menor eficiência e produtividade e a maior vulnerabilidade são especialmente frequentes nas formações arbustivas, sobretudo em condições de alta pressão antrópica, resultando em RUE e evapotranspiração reduzidos. Esse padrão compromete a sustentabilidade hídrica dessas tipologias e aumenta sua susceptibilidade à degradação.

Os resultados demonstraram que a produtividade hídrica da Caatinga é fortemente influenciada pela interação entre a estrutura da vegetação, a disponibilidade de água e os

impactos das perturbações antrópicas. Tipologias mais densas conseguem manter regimes hidrológicos mais estáveis por meio da regulação do microclima, da redução da evaporação do solo e da otimização do uso da água ao longo do dia. Em contraste, formações mais abertas enfrentam maiores dificuldades para sustentar a funcionalidade hídrica. A análise espacial e temporal da RUE evidenciou, de forma clara, que áreas degradadas apresentam perdas significativas de produtividade hídrica.

Desta forma, reforça-se a importância de priorizar a conservação e restauração de tipologias mais resilientes, como a CAD e a CAA, uma vez que desempenham papel crucial na manutenção da produtividade hídrica e na estabilização do ciclo hidrológico da Caatinga. Manejo voltado à mitigação dos impactos das perturbações deve ser implementado visando o uso do solo que regulam o processo de regeneração da vegetação e manejo da eficiência hídrica.

A indicação, desse modo, vem ainda fortalecer a necessidade de uma maior utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e de análise ambiental, dentre elas o EVI e RUE, assim como SSM e LST. Sobretudo, tais métricas ajudaram a identificar padrões espaciais e temporais da produtividade hídrica, assim como avaliar os efeitos das perturbações antrópicas nas distintas tipologias da Caatinga. O uso dessas ferramentas, desse modo, não só garante o acompanhamento da dinâmica ecológica e hídrica, como também a possibilidade de potencializar as ações de manejo e conservação.

Como aplicação prática dos resultados apresentados, foi desenvolvido o **Aplicativo D.3, descrito no Apêndice D**, uma plataforma interativa que integra métricas de produtividade (EVI, RUE) e variáveis hidrológicas (precipitação CHIRPS, evapotranspiração SEBAL, temperatura da superfície – LST e umidade superficial do solo – SSM/OPTRAM). Essa ferramenta, implementada no ambiente Google Earth Engine (GEE), permite analisar a funcionalidade eco-hidrológica da vegetação lenhosa da Caatinga em diferentes contextos espaciais e temporais, apoiando o monitoramento ambiental e subsidiando estratégias de gestão sustentável em áreas semiáridas.

## 7 DINÂMICA DA FENOLOGIA E SUA RESPOSTA ÀS PERTURBAÇÕES ANTRÓPICAS NA CAATINGA

### 7.1 INTRODUÇÃO

A fenologia vegetal é uma ferramenta essencial para compreender como a vegetação responde às variações climáticas e às pressões antrópicas, sendo particularmente útil na avaliação da resiliência ecossistêmica frente às mudanças ambientais (Piao et al., 2019). Como processo-chave nos ecossistemas terrestres, ela regula fenômenos como o ciclo do carbono, a evapotranspiração, a produtividade primária e as interações ecológicas (Lieth, 2013; Morellato et al., 2016).

Nos ecossistemas tropicais sazonais, como a Caatinga, a fenologia se destaca por sua forte ligação com o regime hídrico e energético, funcionando como indicador da resposta da vegetação a estímulos externos, sejam eles naturais ou antrópicos (Cleland et al., 2007; Richardson et al., 2013). Por apresentar um regime hídrico irregular, a vegetação desenvolve estratégias fenológicas adaptativas, moldadas pela variabilidade climática (Justiniano e Fredericksen, 2000; Zhang et al., 2005).

Na Caatinga, a disponibilidade de água é o principal fator que regula os ciclos fenológicos, determinando eventos como a caducifolia e a rebrota da vegetação em resposta aos pulsos sazonais de precipitação (Santos et al., 2021). As diferentes formações vegetacionais apresentam respostas fenológicas distintas, sendo que tipologias mais densas demonstram maior resiliência, enquanto as mais abertas são mais vulneráveis a variações ambientais e antrópicas (Jesus et al., 2021; Poloschi et al., 2020; Benítez et al., 2024). Embora o fator água seja determinante, as perturbações antrópicas, como desmatamento, sobrepastejo e uso intensivo do solo, têm provocado alterações nos ciclos vegetativos, afetando sua produtividade e sazonalidade (Ribeiro et al., 2015; Araujo et al., 2023).

No entanto, para capturar a variabilidade ecológica da paisagem de forma mais detalhada, como os processos que ocorrem dentro de diferentes usos da terra ou ecossistemas, é necessário que a detecção de mudanças aconteça em um nível suficientemente preciso (Pettorelli et al., 2014).

Embora as observações terrestres ofereçam dados detalhados e de alta acurácia, sua aplicação é limitada pela dificuldade de cobertura contínua em larga escala, especialmente em ambientes extensos e de difícil acesso (Garrity et al., 2011; Morellato et al., 2016). Diante dessas

limitações, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta eficaz, possibilitando observações repetidas em curtos intervalos de tempo por meio de sensores multiespectrais (Brown et al., 2012).

Nesse contexto, destaca-se a Fenologia da Superfície Terrestre (LSP, do inglês *Land Surface Phenology*), uma abordagem emergente baseada no uso de séries temporais de dados de sensoriamento remoto para acompanhar e monitorar a fenologia, caracterizar padrões sazonais e dinâmicos da vegetação em larga escala (De Beurs e Henebry, 2004; Caparros-Santiago et al., 2021; Dronova e Taddeo, 2022).

A LSP utiliza principalmente índices espectrais derivados de sensores orbitais, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI), que permitem identificar a dinâmica fenológica ao longo do tempo em diferentes escalas geográficas (Huete et al., 2002; Reed et al., 2009), além de contribuir na previsão de padrões futuros diante de cenários de mudanças climáticas (Andrade et al., 2021).

Entre esses índices, o EVI tem se destacado por sua maior sensibilidade em áreas de alta densidade de biomassa, sendo amplamente utilizado na caracterização da fenologia da vegetação (Adole et al., 2016). A partir de suas séries temporais, é possível extrair métricas fenológicas que delimitam eventos do ciclo vegetativo, como o início da estação de crescimento (SOS, do inglês *Start of Season*), o pico da atividade vegetativa (POS, do inglês *Peak of Season*) e o final da estação (EOS, do inglês *End of Season*), que, em geral, correspondem aos estágios de brotamento, maturidade e senescência da vegetação (Tuanmu et al., 2010; Caparros-Santiago et al., 2021).

A LSP, permite não apenas monitorar a dinâmica temporal da vegetação, mas também compreender suas interações com o clima e detectar padrões de alteração provocados por perturbações ambientais. Sua capacidade de captar variações interanuais na fenologia torna essa abordagem particularmente útil para analisar paisagens como mosaicos dinâmicos, revelando transições entre estados de equilíbrio, degradação ou recuperação (Pomara et al., 2024). Como a composição e a abundância de espécies podem ser modificadas por distúrbios naturais ou antrópicos dentro de um mesmo pixel de imagem, a LSP também se apresenta como ferramenta eficaz para avaliar impactos ambientais e a resiliência da vegetação (Zhang et al., 2023).

Nesse sentido, a aplicação da LSP na Caatinga se revela promissora, ainda que embrionária. Algumas pesquisas recentes têm utilizado essas abordagens para mapear variações fenológicas e investigar os impactos das mudanças climáticas e das perturbações antrópicas sobre a vegetação (Jesus et al., 2021; Borges et al., 2022; Ramos et al., 2023; Medeiros et al.,

2022). Apesar dos avanços, permanece a necessidade de ampliar e aprofundar esse tipo de análise, a fim de aprimorar a compreensão da dinâmica fenológica da Caatinga.

Dessa forma, este capítulo tem como objetivo investigar a dinâmica fenológica da Caatinga e sua resposta às perturbações antrópicas, a partir da aplicação da LSP e análise de métricas fenológicas derivadas de séries temporais. A análise visa compreender de que maneira as diferentes tipologias vegetacionais e seus estados dinâmicos afetam os padrões fenológicos e a capacidade de resiliência da vegetação. Os resultados devem subsidiar ações mais precisas de conservação, restauração e manejo sustentável, contribuindo para a mitigação dos processos de degradação da vegetação da Caatinga.

## 7.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia adotada neste capítulo busca compreender a dinâmica fenológica da vegetação lenhosa da Caatinga e sua resposta às perturbações antrópicas por meio da LSP. Para isso, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, estatísticas espaciais e séries temporais de dados espectrais, permitindo a identificação de padrões sazonais e suas variações interanuais.

### 7.2.1 Aquisição de Dados e Pré-Processamento

A análise foi baseada em diferentes fontes de sensoriamento remoto, organizadas em duas abordagens principais: análise da fenologia da vegetação (LSP) e avaliação de fatores ambientais, permitindo a caracterização da dinâmica vegetacional lenhosa da Caatinga e a quantificação processos ecológicos e das perturbações antrópicas na vegetação. Todos os dados foram adquiridos e processados por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE), garantindo eficiência no armazenamento, processamento e análise das séries temporais do período de 2016 a 2024.

#### 7.2.1.1 Dados da Fenologia da Vegetação

Para a fenologia da vegetação, foram utilizadas imagens ópticas do sensor Sentinel-2A, disponibilizadas pelo programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA). As imagens possuem resolução espacial de 10 metros incluem bandas espectrais no vermelho,

infravermelho próximo e azul, fundamentais para o cálculo do Índice de Vegetação Aprimorado (EVI), utilizado como base para a obtenção das métricas fenológicas.

#### 7.2.1.2 Dados dos Fatores Ambientais (Armazenamento do Carbono e Densidade da Biomassa)

Complementarmente, foram considerados fatores ambientais relevantes para entender os processos ecológicos subjacentes à dinâmica fenológica, especialmente o armazenamento de carbono e a densidade da biomassa acima do solo (AGB).

A estimativa do armazenamento de carbono foi realizada com base em produtos da plataforma MODIS/NASA, utilizando os conjuntos de dados MOD17A2H (Produtividade Primária Bruta – GPP) e MOD17A3HGF (Produtividade Primária Líquida – NPP), ambos com resolução espacial de 500 metros, representando a produtividade da vegetação como proxy para o acúmulo de carbono.

A densidade da biomassa acima do solo (AGB) foi estimada a partir da integração de múltiplas fontes de dados. As informações LiDAR foram obtidas a partir do produto GEDI L4A Raster Aboveground Biomass Density (Versão 2.1), com resolução espacial de 25 metros. Para refinar a modelagem, foram incorporados índices espectrais derivados das imagens do Sentinel-2, como EVI, NDVI, NDBI (Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas), BSI (Índice de Solo Exposto) e MNDWI (Índice de Diferença Normalizada para Água Modificada).

Além dos dados ópticas, foram incorporados dados de radar do Sentinel-1 (SAR – Synthetic Aperture Radar), com resolução espacial de 10 metros e polarizações VV e VH, permitindo a caracterização estrutural da vegetação. Para avaliar a influência do relevo na distribuição da biomassa, foram utilizadas variáveis topográficas extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão NASADEM, com resolução espacial de 30 metros.

#### 7.2.1.3 Integração com dados dos capítulos anteriores:

Os dados de fenologia utilizados neste capítulo foram refinados a partir das etapas metodológicas descritas nos Capítulos 3 e 4. A máscara de vegetação lenhosa, definida no Capítulo 3, foi aplicada para garantir que os índices fossem extraídos exclusivamente sobre áreas com cobertura lenhosa. A classificação tipológica estabelecida no Capítulo 4 possibilitou a diferenciação das análises entre as diferentes formações e estágios sucessionais da Caatinga, assegurando maior precisão na interpretação das variações espaço-temporais.

## 7.2.2 Método e Análise Dos Dados

### 7.2.2.1 Modelo de detecção de Fenologia da Superfície Terrestre (LSP)

A análise da fenologia da vegetação na Caatinga foi conduzida com base no conceito de LSP, que permite identificar padrões sazonais da vegetação por meio de séries temporais de índices espectrais extraídos de imagens de satélite. A literatura aponta que a maioria dos estudos sobre LSP emprega séries temporais de índices de vegetação espectral derivados de imagens ópticas (Broich et al., 2015). Sendo os índices mais utilizados o NDVI e o EVI, os quais permitem mensurar variações na biomassa verde da vegetação ao longo do tempo (de Beurs e Henebry, 2010; Liang e Schwartz, 2009; Zhang et al., 2003).

Contudo, a aplicação de técnicas convencionais de LSP à vegetação da Caatinga apresenta desafios metodológicos. A maioria dos algoritmos desenvolvidos para caracterização fenológica foi concebida para ecossistemas das latitudes médias e altas do Hemisfério Norte, onde os ciclos fenológicos são predominantemente anuais e seguem um padrão previsível dentro de uma janela temporal específica (de Beurs e Henebry, 2010). No entanto, em ecossistemas semiáridos, como a Caatinga, os eventos de esverdeamento e senescência não seguem necessariamente um ciclo anual fixo, sendo fortemente modulados pela variabilidade climática e pelos pulsos sazonais de precipitação (Brown E de Beurs, 2008).

Diante desse contexto, a pesquisa propõe uma adaptação do conceito tradicional de LSP, adotando uma abordagem mais flexível que não se limita as fases de esverdeamento e senescência a um ciclo fenológico anual fixo. Em vez disso, as fases fenológicas são definidas como eventos discretos, identificados a partir do EVI, que podem ocorrer em qualquer momento do ano. Essa estratégia possibilita uma representação mais precisa da dinâmica fenológica da vegetação lenhosa da Caatinga, fortemente influenciada pela variabilidade interanual das chuvas.

Para a implementação do modelo, foi desenvolvido um algoritmo de código aberto no Google Earth Engine (GEE), utilizando imagens do Sentinel-2A com resolução espacial de 10 metros. Essa abordagem permite a extração automática das métricas fenológicas sem necessidade de download e processamento local das imagens, garantindo eficiência computacional e reprodutibilidade científica.

Atualmente, poucos estudos desenvolveram algoritmos fenológicos baseados em imagens de alta resolução no GEE utilizando dados gratuitos de observação da Terra (Descals



et al., 2020; Orusa et al., 2023; Salinero-Delgado et al., 2021; Bolton et al., 2020). Assim, este estudo adapta e aprimora modelos LSP dos estudos descritos, ajustando-os às especificidades fenológicas da vegetação lenhosa da Caatinga para proporcionar uma representação mais precisa de sua dinâmica sazonal.

#### 7.2.2.1.1 Interpolação Temporal e Suavização da Série Fenológica

A suavização da série fenológica foi realizada utilizando o filtro Savitzky-Golay (SG), um método amplamente empregado para reduzir ruídos em séries temporais de índices espectrais, preservando padrões fenológicos essenciais. A variabilidade atmosférica e a presença de nuvens frequentemente introduzem distorções nos dados espectrais, tornando necessária a aplicação de um filtro que mantenha a fidelidade dos eventos sazonais da vegetação (Chen et al., 2004; Zeng et al., 2020).

O filtro Savitzky-Golay opera ajustando um polinômio localmente dentro de uma janela deslizante de dados e substituindo o valor central da janela pelo valor ajustado. No presente estudo, foi adotado um polinômio quadrático e um intervalo de 12 dias, compatível com a frequência de aquisição do Sentinel-2A, garantindo um balanço entre suavização e preservação das transições fenológicas (Savitzky e Golay, 1964). Essa escolha permite manter detalhes críticos da curva espectral, evitando a super-suavização que poderia mascarar eventos fenológicos relevantes, como início, pico e fim da estação de crescimento da vegetação.

Matematicamente, a suavização pelo filtro Savitzky-Golay pode ser expressa por:

$$r_t = \frac{1}{n} \sum_{j=-m}^m c_j e'_{t+j} \quad (45)$$

Onde,  $e'_t$  representa o índice espectral (EVI ou NDVI) no tempo  $t$ ,  $r_t$  é o valor suavizado pelo filtro SG,  $j$  representa a distância em relação ao tempo  $t$ ,  $c_j$  são os coeficientes de ponderação,  $n$  é o tamanho da janela de suavização (igual a  $2m+1$ ), e  $m$  é meia janela de suavização (Chen et al., 2004). Para o presente estudo, o valor de  $m = 12$  dias foi adotado, garantindo a compatibilidade com a periodicidade do Sentinel-2A e permitindo a captura de padrões fenológicos relevantes na Caatinga.

O método Savitzky-Golay tem se mostrado bastante eficiente na reconstrução de séries temporais, superando outros modelos de suavização em diversos contextos. Trabalhos como os de Zhou et al. (2016) e Liu et al. (2017) evidenciam que o método é eficiente na remoção de ruídos, ao mesmo tempo em que mantém os padrões fenológicos. Além disso, o uso do método em produtos fenológicos consolidados, como os gerados a partir do MODIS, reforça sua confiabilidade e sua utilidade em pesquisas voltadas à ecologia e ao clima (Cao et al., 2018).

#### 7.2.2.1.2 Extração das Métricas Fenológicas

A extração das métricas fenológicas foi realizada a partir da série temporal suavizada do EVI, permitindo identificar com precisão os principais eventos fenológicos da vegetação na Caatinga. Para isso, adotou-se um limiar (*threshold*) dinâmico correspondente a 20% da amplitude anual do EVI, um parâmetro amplamente utilizado na literatura por sua precisão na detecção de transições fenológicas (Medeiros et al., 2022; Xie et al., 2023; Streher et al., 2017; Broich et al., 2015; Ramirez-Cuesta et al., 2021).

A escolha desse limiar percentual busca equilibrar a sensibilidade e a estabilidade na identificação dos eventos fenológicos. Valores de thresholds abaixo 20% tendem a captar variações mais sutis no crescimento da vegetação, mas também aumentam a sensibilidade a ruídos. Valores mais altos podem suavizar excessivamente as transições fenológicas, dificultando sua detecção (Xie et al., 2023; Broich et al., 2015). No caso da Caatinga, que apresenta uma sazonalidade marcada, o uso de um limiar de 20% se mostra adequado, por permitir uma identificação equilibrada entre os períodos de dormência e de crescimento vegetativo.

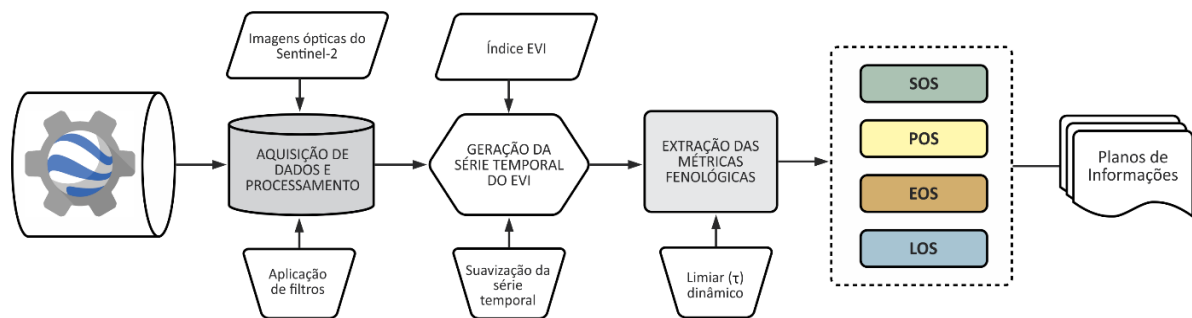
A identificação dos eventos fenológicos foi realizada com base na variação do EVI ao longo do tempo, determinando o início do crescimento vegetativo e o início da senescência com base no primeiro e no último dia em que o índice ultrapassa o limiar definido. Esse threshold foi estimado de forma dinâmica, considerando a amplitude da série temporal, conforme a equação:

$$\tau = \phi \times \{Vi(\min) - Vi(\max)\} + Vi(\min) \quad (46)$$

onde  $\tau$  representa o threshold dinâmico,  $Vi(\max)$  e  $Vi(\min)$  correspondem aos valores máximos e mínimos do EVI dentro do período analisado, e  $\phi$  corresponde à fração da amplitude da série temporal, adotada como 0,2 (20%).

Com base nessa metodologia, foram extraídas as principais métricas fenológicas que descrevem o comportamento da vegetação ao longo do ciclo anual. O início da estação fenológica (SOS) foi definido como o primeiro dia em que o EVI ultrapassa o limiar estabelecido ( $\tau$ ), sinalizando o começo do crescimento vegetativo. O pico da estação (POS) representa o momento de maior atividade fotossintética, sendo determinado como o ponto médio entre o SOS e o EOS. O final da estação fenológica (EOS) corresponde ao último dia em que o EVI se mantém acima do limiar, marcando o início da senescência. Por fim, a duração da estação (LOS) é calculada pelo intervalo entre o SOS e o EOS, refletindo o tempo total de atividade vegetativa ao longo do ano. A seguir é apresentado um fluxograma das etapas metodológicas empregadas.

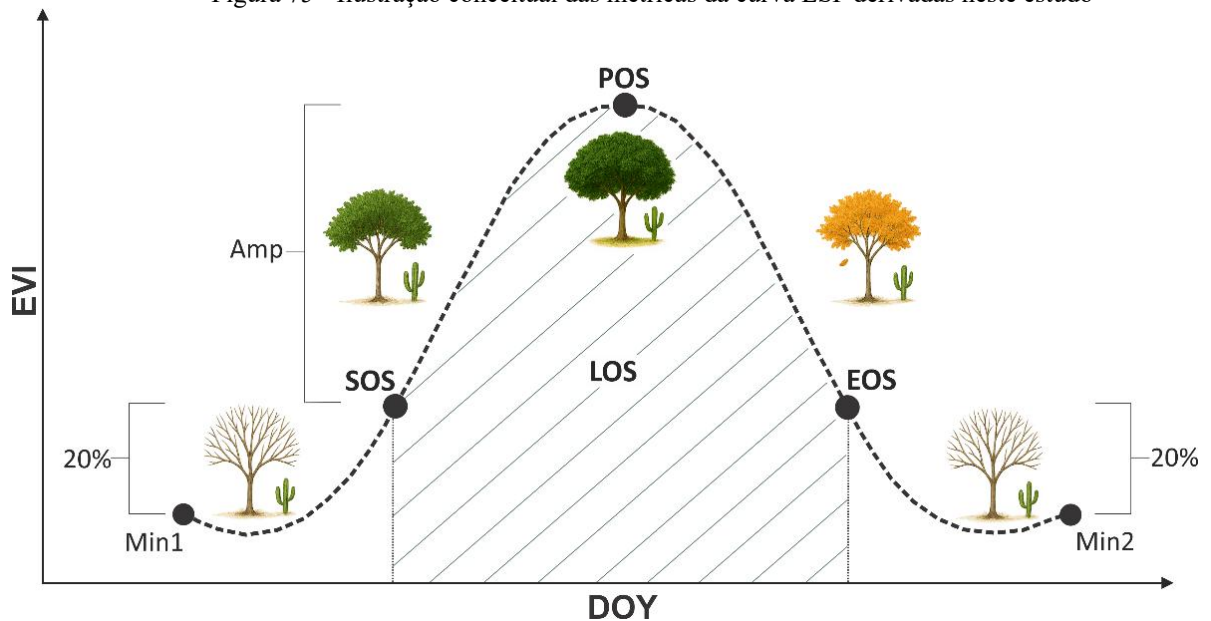
Figura 74 - Fluxograma da modelagem LSP para obtenção das métricas fenológicas



Fonte: O autor

A extração das métricas foi feita em nível de pixel, o que permitiu uma análise espacial mais detalhada da resposta fenológica da vegetação na Caatinga. Os valores foram expressos em dias do ano (DOY, do inglês Day of Year), possibilitando uma comparação direta entre diferentes regiões e períodos. A **Figura 75** ilustra o conceito das métricas LSP, demonstrando como o rastreamento dessas variáveis ao longo do tempo possibilita a quantificação da variabilidade intra e interanual dos episódios fenológicos.

Figura 75 - Ilustração conceitual das métricas da curva LSP derivadas neste estudo



Legenda: O primeiro e o segundo ponto mínimo (Min1 e Min2); o pico da estação (POS); o início e o fim da estação (SOS e EOS) como 20% da diferença entre pico e o respectivo ponto Min. As outras métricas são a duração da estação (LOS) em dias do ano (DOY) entre SOS e EOS (área hachurada na curva), e a amplitude da estação de crescimento (Amp). Fonte: O autor

O monitoramento contínuo dessas métricas permite analisar padrões espaciais e temporais da fenologia da vegetação, possibilitando correlações com variações climáticas, mudanças ambientais e práticas de uso da terra.

Como desdobramento desta etapa metodológica, foi desenvolvida uma aplicação interativa no ambiente Google Earth Engine (GEE), que incorpora o modelo fenológico LSP aplicado à Caatinga. Essa ferramenta, apresentada no **Aplicativo D.4, apresentado no Apêndice D**, permite estimar e visualizar de forma dinâmica as métricas SOS, POS, EOS e LOS ao longo de séries temporais, contribuindo para o monitoramento automatizado da fenologia e a análise espacial e temporal do comportamento sazonal da vegetação lenhosa em áreas semiáridas.

#### 7.2.2.2 Fatores ambientais

##### 7.2.2.2.1 Estimativa do Armazenamento de Carbono

A estimativa do armazenamento de carbono na vegetação foi realizada com base na produtividade primária bruta (GPP) e na produtividade primária líquida (NPP), obtidas por sensoriamento remoto. A metodologia segue abordagens consolidadas na literatura (Running e

Zhao, 2019; Zhang et al., 2009; Heinsch et al., 2006), com estruturação conforme a proposta de Ahmed e Harishnaika (2024).

Os dados de produtividade primária foram extraídos dos produtos MODIS, especificamente os produtos MODIS MOD17A2H (GPP) e MOD17A3HGF (NPP), que estimam a assimilação de carbono pela vegetação e a fração que permanece na biomassa após a respiração autotrófica, respectivamente.

Para a estimativa do armazenamento de carbono, foi considerada a relação entre GPP e NPP, conforme a equação:

$$NPP_8 = \left( \frac{GPP_8}{GPP_Y} \right) \times NPP \quad (47)$$

Onde,  $NPP_8$  representa a produtividade primária líquida em um período de 8 dias,  $GPP_8$  corresponde à produtividade primária bruta no mesmo período,  $GPP_Y$  refere-se à produtividade primária bruta anual, e  $NPP$  é a produtividade primária líquida total.

Com base na  $NPP$ , é possível estimar a biomassa acumulada, que pode ser convertida em carbono armazenado por meio de coeficientes específicos de conversão, conforme indicado por Schlesinger (1997). Neste estudo, o armazenamento de carbono é expresso em  $gC/m^2$  (gramas de carbono por metro quadrado).

#### 7.2.2.2.2 Estimativa da Densidade Biomassa Acima do Solo

A estimativa da densidade da biomassa acima do solo (AGBD, do inglês *Aboveground Biomass Density*) foi realizada por meio de um modelo de regressão baseado no algoritmo *Random Forest* (RF), implementado na plataforma Google Earth Engine (GEE). A abordagem metodológica foi baseada nos trabalhos de Shendryk et al. (2022), Zurqani et al. (2024) e no tutorial de Spatial Thoughts (2024), que integram dados LiDAR do *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI), imagens de sensores ópticos, de radar, e topográficos com técnicas de aprendizado de máquina para a modelagem da biomassa florestal.

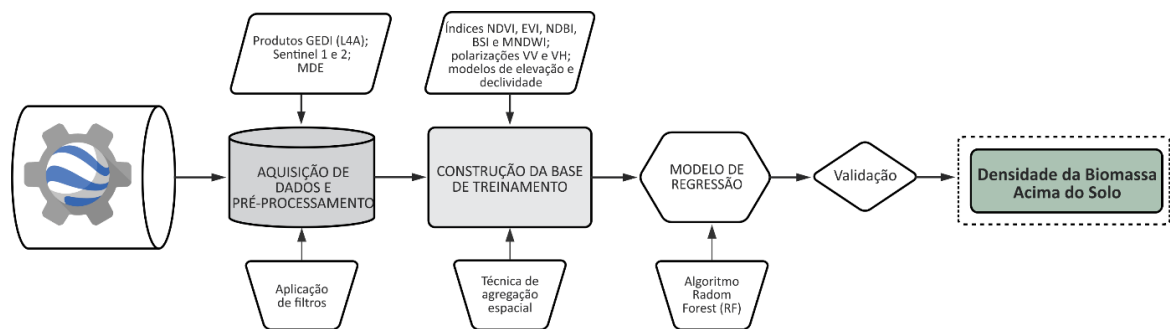
#### **Construção da Base de Treinamento**

Para a modelagem da densidade da biomassa acima do solo, foi necessário integrar as medições pontuais do GEDI L4A com os dados contínuos dos sensores Sentinel-1, Sentinel-2

e do Modelo Digital de Elevação (DEM). Devido à resolução espacial de 25 metros e à distribuição irregular dos pontos GEDI, adotou-se a técnica de agregação espacial em células de  $100 \times 100$  metros, conforme proposto por Shendryk et al. (2022). Essa abordagem permitiu extrair estatísticas descritivas das variáveis espectrais e topográficas, minimizando erros decorrentes de desalinhamentos espaciais.

As imagens foram reamostradas para 10 metros por interpolação bilinear, assegurando maior compatibilidade entre os diferentes conjuntos de dados. A amostragem foi conduzida de forma estratificada, garantindo representatividade de diferentes classes de biomassa e minimizando vieses na modelagem. Essa abordagem aprimorou a capacidade preditiva do modelo, tornando as estimativas mais precisas e adequadas à heterogeneidade estrutural da vegetação lenhosa da Caatinga. A figura a seguir ilustra a sequência do procedimento metodológico empregado.

Figura 76 - Fluxograma do processamento e modelagem para estimativa da densidade da biomassa



Fonte: O autor

A avaliação da acurácia preditiva do modelo de regressão foi realizada por meio de uma base de dados independente, com a aplicação de métricas estatísticas apropriadas para regressão, como o Erro Médio Quadrático (RMSE), Erro Absoluto Médio (MAE) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). As informações completas sobre a validação do modelo, incluindo gráficos e análises quantitativas, estão apresentadas na **Avaliação B.2, disponível no Apêndice B**.

### ***Geração do Mapa de Biomassa Predita***

Após o treinamento, o modelo foi aplicado para estimar a biomassa em todos os pixels da região de estudo, resultando na produção de um mapa contínuo de biomassa acima do solo.

Todo o processo foi realizado na plataforma Google Earth Engine, o que garantiu agilidade no processamento e facilidade de escalabilidade e eficiência computacional.

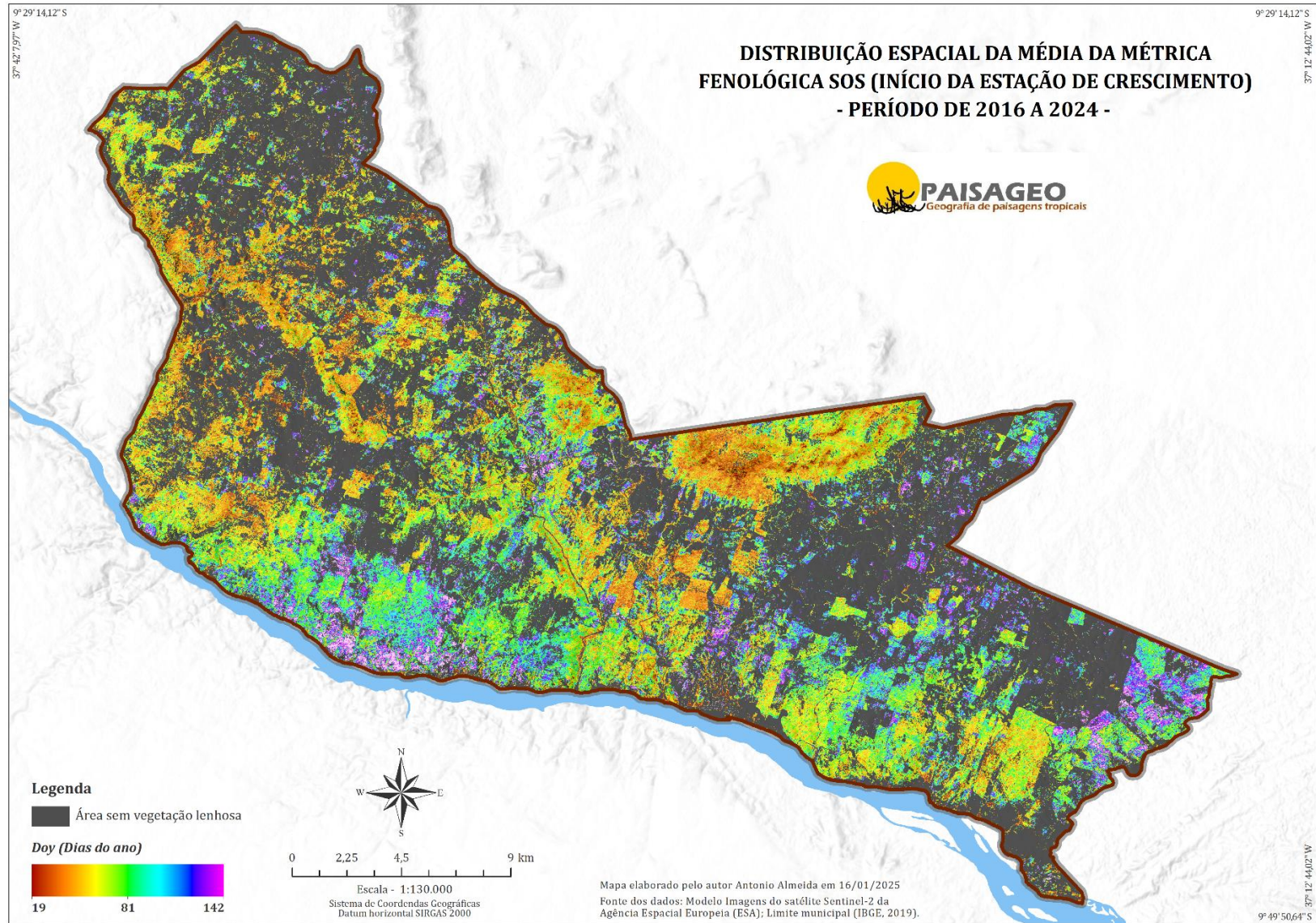
### 7.3 PADRÕES ESPACIAIS DA FENOLOGIA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE (LSP)

A análise dos padrões espaciais da fenologia da superfície terrestre (LSP), permite indicar que as condições meteorológicas, principalmente a precipitação, e as perturbações antrópicas causam alterações nos ciclos vegetativos. Em regiões semiáridas, como a caatinga, onde o fornecimento hídrico é o grande regulador, a precipitação medeia expressivamente o vigor e a fenologia da vegetação (Justiniano e Fredericksen, 2000; Zhang et al., 2005; Piao et al., 2006; Wei et al., 2024). Dados de pesquisas indicam que as perturbações antrópicas modificam a variação fenológica da vegetação e restringem sua resiliência (Jiang et al., 2002; Fang et al., 2023).

Com relação aos padrões da LSP, quatro métricas fenológicas são fundamentais para compreensão das mudanças da vegetação: o início da temporada de crescimento (SOS, Start of Season), o pico da temporada (POS, Peak of Season), o final da temporada (EOS, End of Season) e a duração da temporada (LOS, Length of Season). Tais métricas, frequentemente utilizadas em diferentes pesquisas, são parâmetros importantes para monitoramento das transformações fenológicas na vegetação em resposta às transformações ambientais (Reed et al., 1994; Ma et al., 2013; Ma et al., 2022). Assim, permitindo identificar variações temporais e espaciais nos ciclos de crescimento vegetativo e suas dinâmicas ecológicas presente na região.

A distribuição espacial da LSP mostra que a vegetação não possui uma resposta padrão para toda a área de estudo, pois sua resposta é influenciada pelo fornecimento local de recursos hídricos e condições microclimáticas (Fisher et al., 2006; Piao et al., 2015; Rankine et al., 2017; Wei et al., 2024). Desta forma, a compreensão dessas dinâmicas, pode ser realizada por meio da figura a seguir, no qual apresenta os mapas das médias das métricas fenológicas (SOS, POS, EOS e LOS) durante o período analisado (**Figuras 77 a 80**). Os mapas evidenciam uma clara distinção entre áreas preservadas, com ciclos fenológicos longos e estáveis, e regiões degradadas, onde os ciclos são encurtados e instáveis.

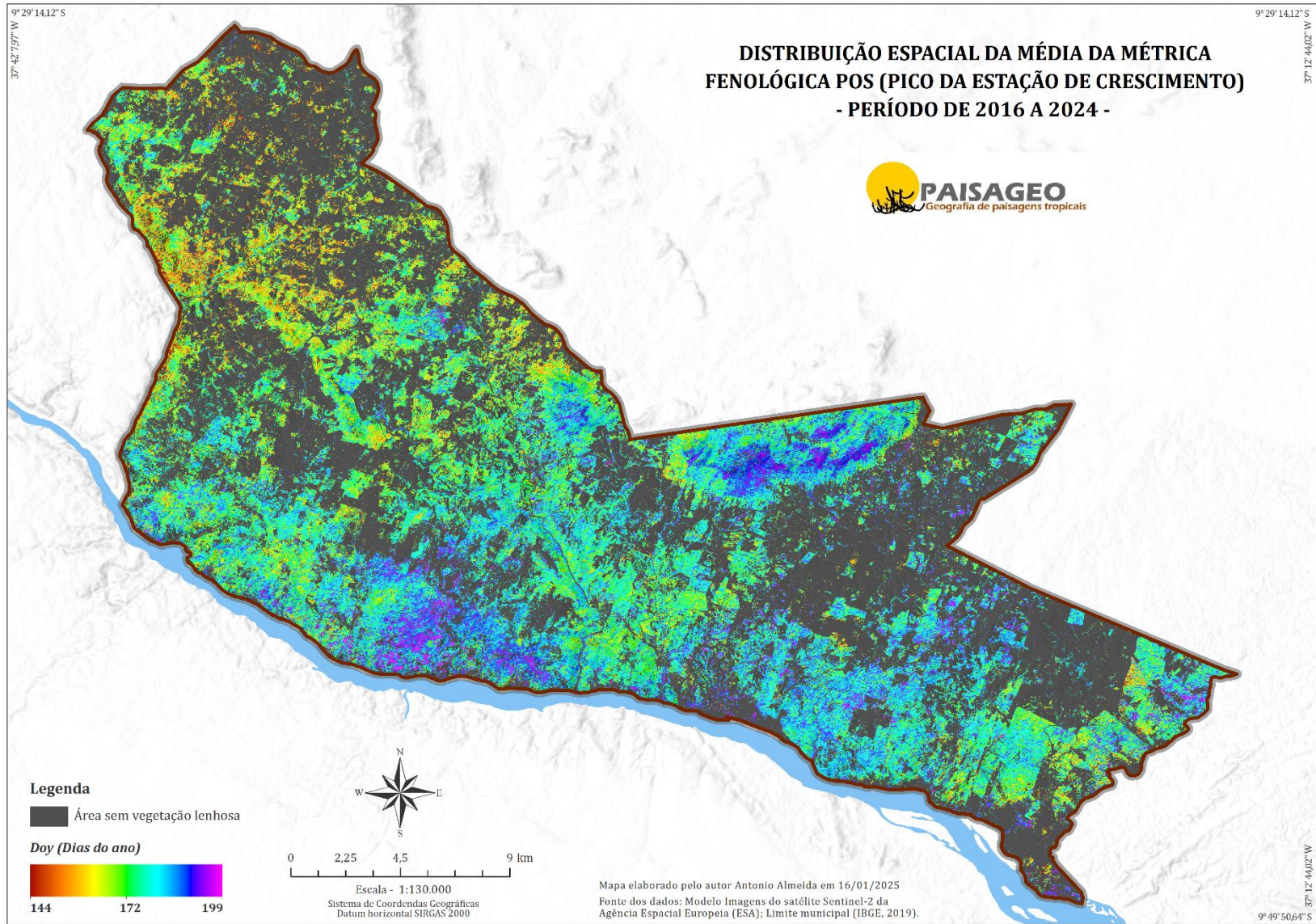
Figura 77 - Distribuição espacial das médias da métricas fenológica SOS.



Fonte: O autor

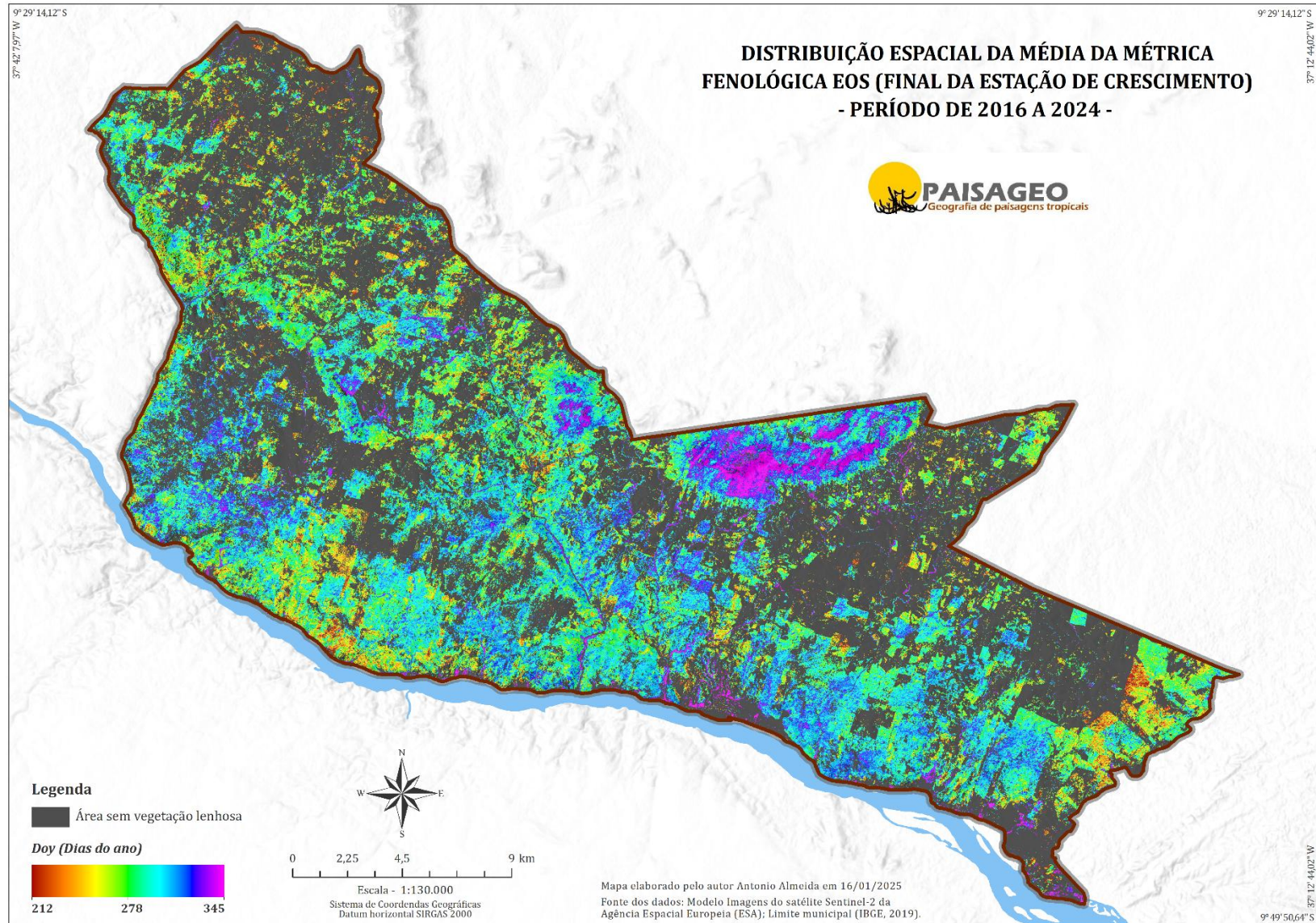


Figura 78 - Distribuição espacial das médias da métrica fenológica POS.



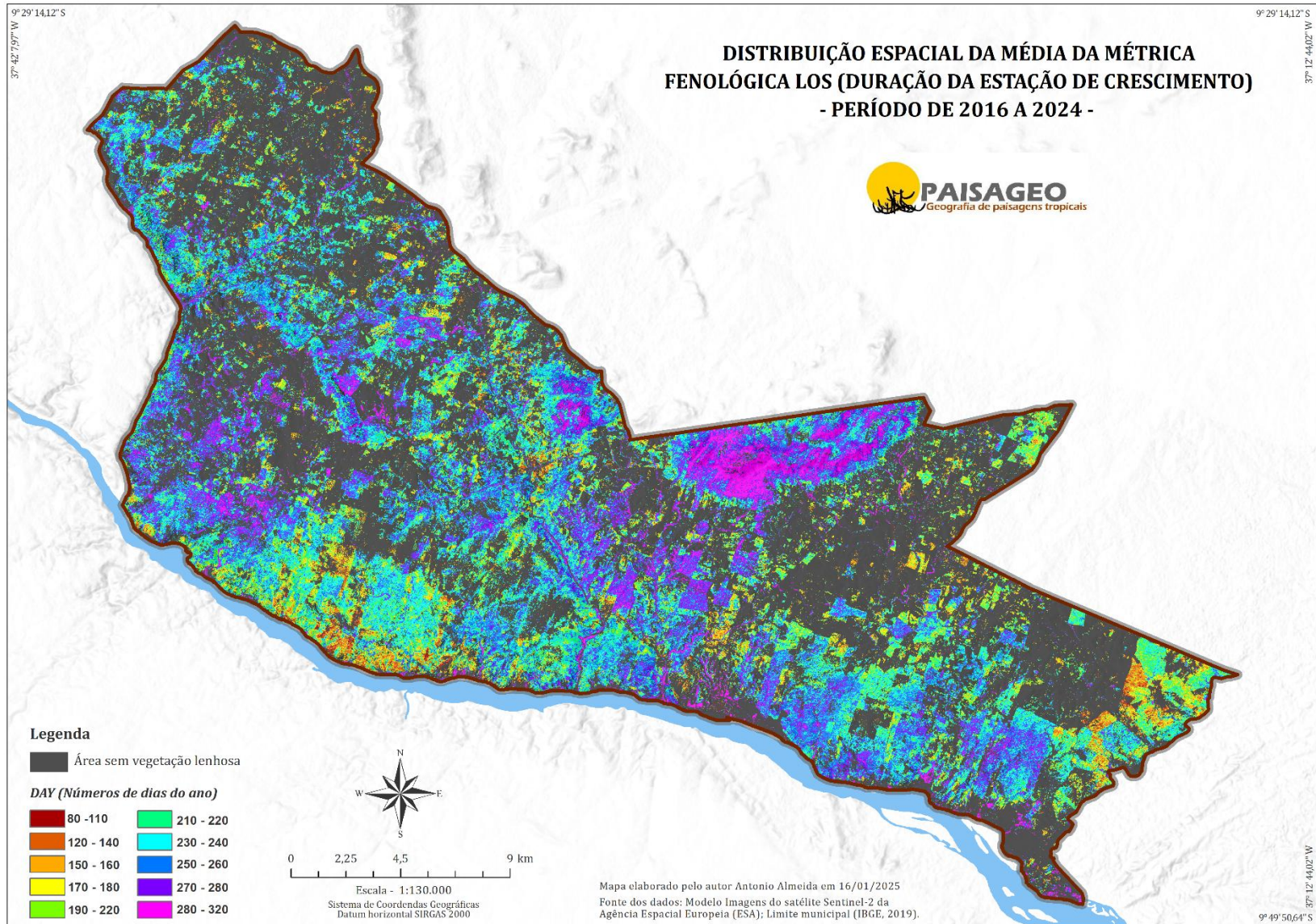
Fonte: O autor

Figura 79 - Distribuição espacial das médias da métrica fenológica EOS.



Fonte: O autor

Figura 80 - Distribuição espacial das médias da métrica fenológica LOS.



Fonte: O autor

Essas variações espaciais mostram que áreas com maior porte arbóreo (ver mapa da distribuição espacial das tipologias, **capítulo 4**), como na Caatinga Arbórea Densa (CAD), apresentam métricas que indicam maior resiliência e capacidade de aproveitar os recursos hídricos disponíveis. Por outro lado, as áreas de porte arbustivo, como na Caatinga Arbustiva Aberta (CArA), ou regiões perturbadas, mostram maior vulnerabilidade às condições climáticas adversas e aos distúrbios antrópicos.

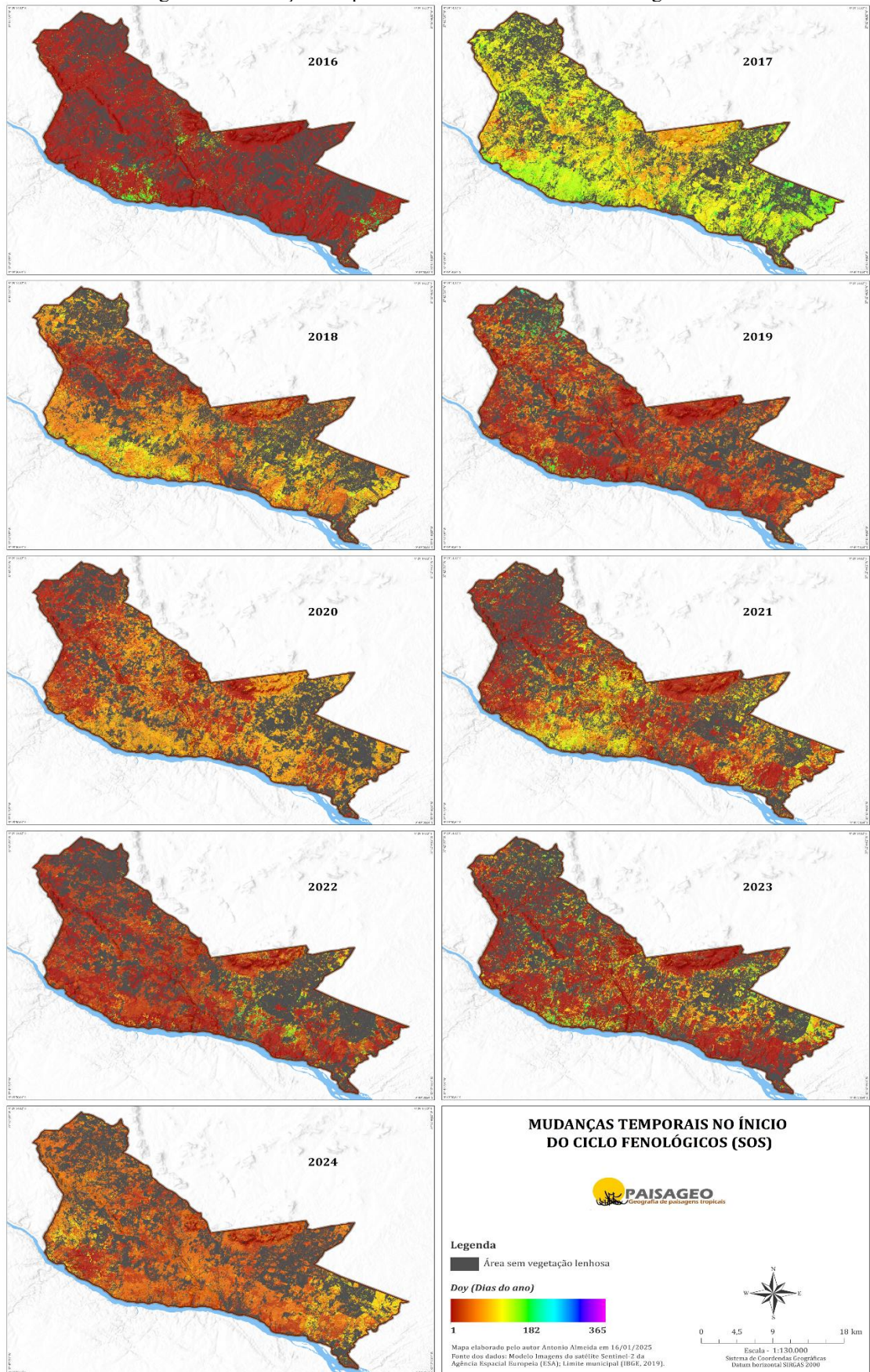
### 7.3.1 Distribuição espacial das métricas fenológicas

O SOS, que reflete o início do ciclo vegetativo, é fundamental para entender como a vegetação responde às primeiras chuvas anuais. Os mapas de SOS dos anos de 2016 a 2024 (**Figura 81**) mostram variações significativas ao longo do tempo e do espaço. Em áreas mais arbóreas e preservadas, o SOS ocorre de forma antecipada, como em 2016 ( $\pm 46$  DOY), indicando uma vegetação mais vigorosa, com maior retenção de umidade, e ciclo fenológico é mais estável e previsível.

Em contrapartida, nas áreas impactadas por atividades humanas, como o desmatamento e a conversão de áreas para agricultura, observa-se um atraso no SOS, como ocorreu em 2017 ( $\pm 139$  DOY), sugerindo dificuldades da vegetação em responder às condições climáticas.

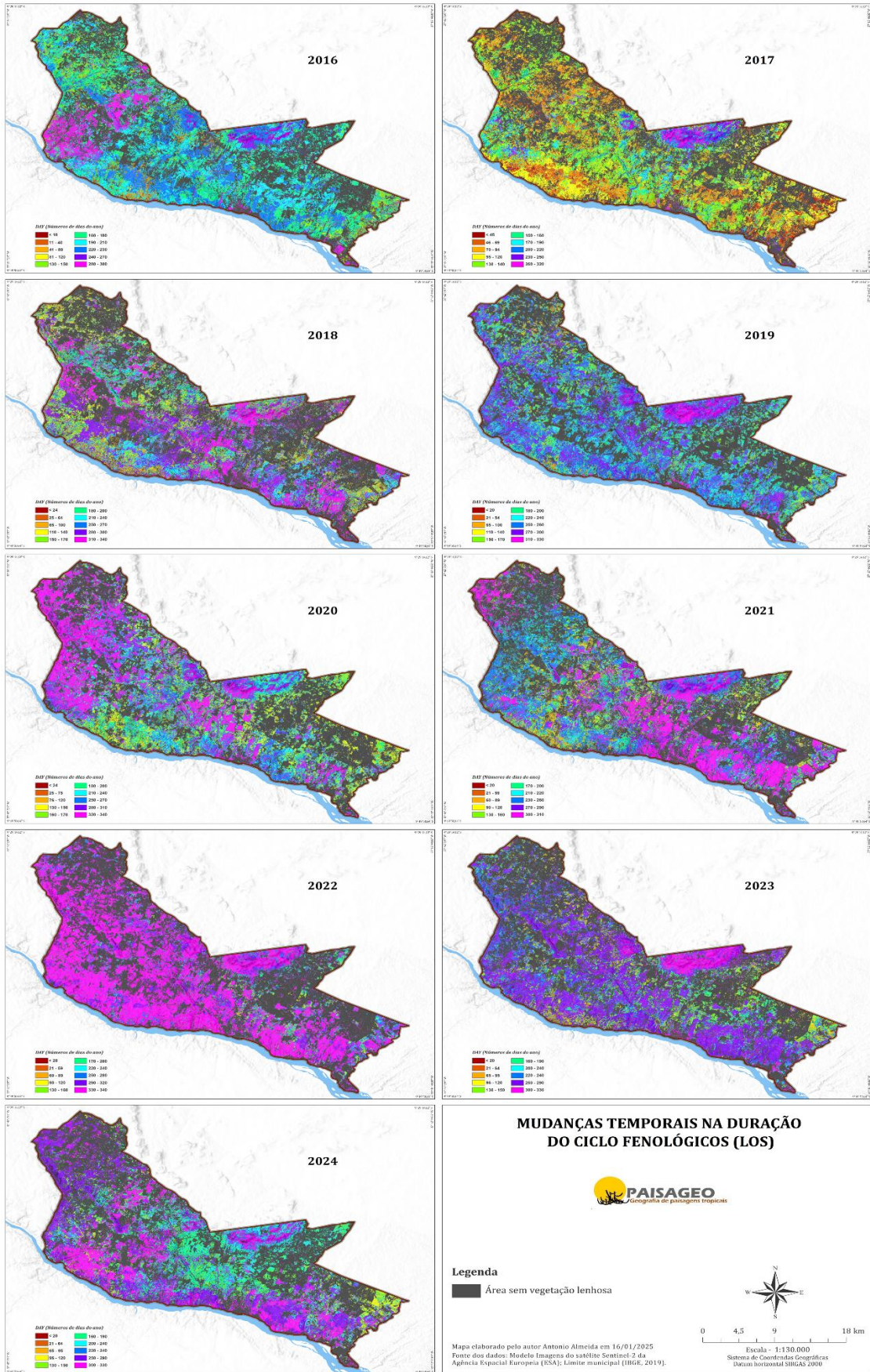
EOS reflete o fim do ciclo vegetativo (início da senescência foliar), uma fase importante para compreender as condições de preservação e impacto das perturbações antrópicas sobre o ciclo fenológico da vegetação. Os mapas anuais de EOS (**Figura 82**) mostram que, nas áreas de maior degradação, o EOS é antecipado, resultando em um ciclo fenológico encurtado, como em 2016 ( $\pm 232$  DOY). Em áreas menos impactadas, como em 2022 ( $\pm 333$  DOY), o EOS ocorre de forma mais tardia, permitindo um ciclo vegetativo completo e mais produtivo. Esse padrão evidencia o contraste entre áreas preservadas, com um EOS mais tardio e um ciclo saudável, e áreas degradadas, onde o EOS é antecipado, refletindo os efeitos negativos das atividades antrópicas.

Figura 81 - Variação temporal das médias da métricas fenológica SOS.



Fonte: O autor

Figura 82 - Variação temporal das médias da métrica fenológica EOS.



Fonte: O autor

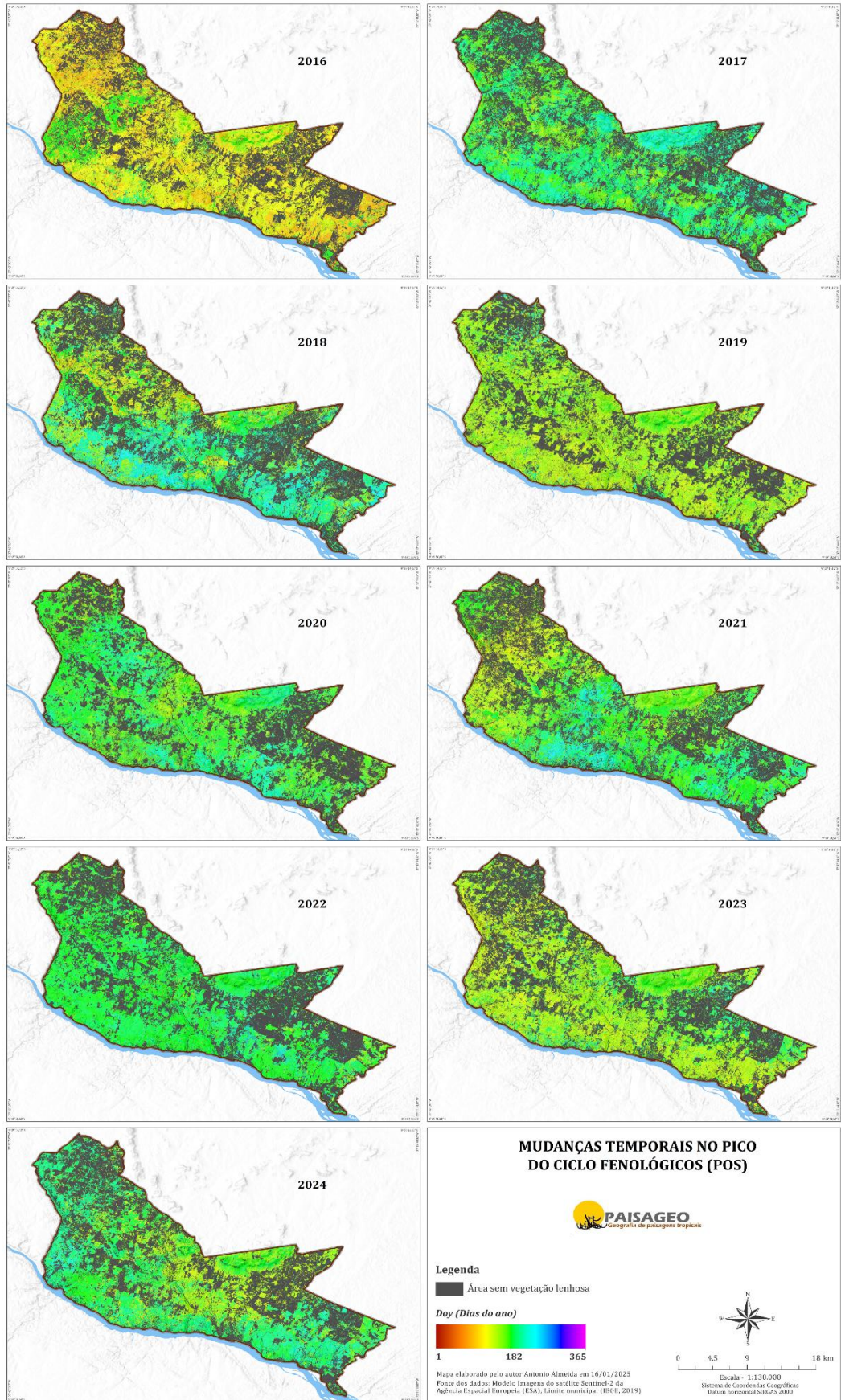
O POS, que representa o período de maior atividade vegetativa, geralmente entre junho e agosto, é diretamente influenciado pelo início (SOS) e pelo fim (EOS) da estação de crescimento. Observa-se que, quando o SOS é retardado e o EOS ocorre mais cedo, o POS tende a assumir valores mais elevados. Isso ocorre porque a vegetação concentra sua atividade metabólica em um período menor de tempo, impulsionando seu pico de crescimento.

Em áreas com menos perturbação, o POS é menos pronunciado e mais consistente, refletindo a resiliência da vegetação, que consegue aproveitar com maior eficiência a água disponível no solo. Isso ocorre devido à boa sincronização entre o atraso do SOS e a antecipação do EOS, onde também resulta em mais massa alocada e um pico de crescimento mais pronunciado.

Os mapas anuais (**Figura 83**) mostram que essa dinâmica é fortemente influenciada pelas condições climáticas e pela disponibilidade de recursos. Em anos com estresse hídrico ou impactos antrópicos significativos, como a antecipação do EOS e o atraso do SOS, observa-se uma elevação no valor do POS, como ocorreu em 2017 ( $\pm 196$  DOY), quando a vegetação concentrou seu crescimento em um intervalo de tempo mais curto. Por outro lado, em anos como 2023, onde o ciclo foi mais equilibrado, o POS foi menor ( $\pm 155$  DOY).

A LOS reflete a capacidade da vegetação de manter seu ciclo completo ao longo do ano, sendo um indicador crucial para avaliar a resiliência da vegetação em áreas com diferentes níveis de degradação. Nas regiões mais úmidas e preservadas, a LOS é estendida, como em 2022 ( $\pm 285$  n° de dias), enquanto nas áreas com maior estresse hídrico, como em 2017 ( $\pm 115$  n° de dias), o ciclo é encurtado, indicando maior vulnerabilidade da vegetação. Os mapas anuais de LOS (**Figura 84**) mostram claramente essa dinâmica, evidenciando que, em anos de maior escassez hídrica, somado com as atividades humanas, o resultado é a significativa redução da duração da estação de crescimento.

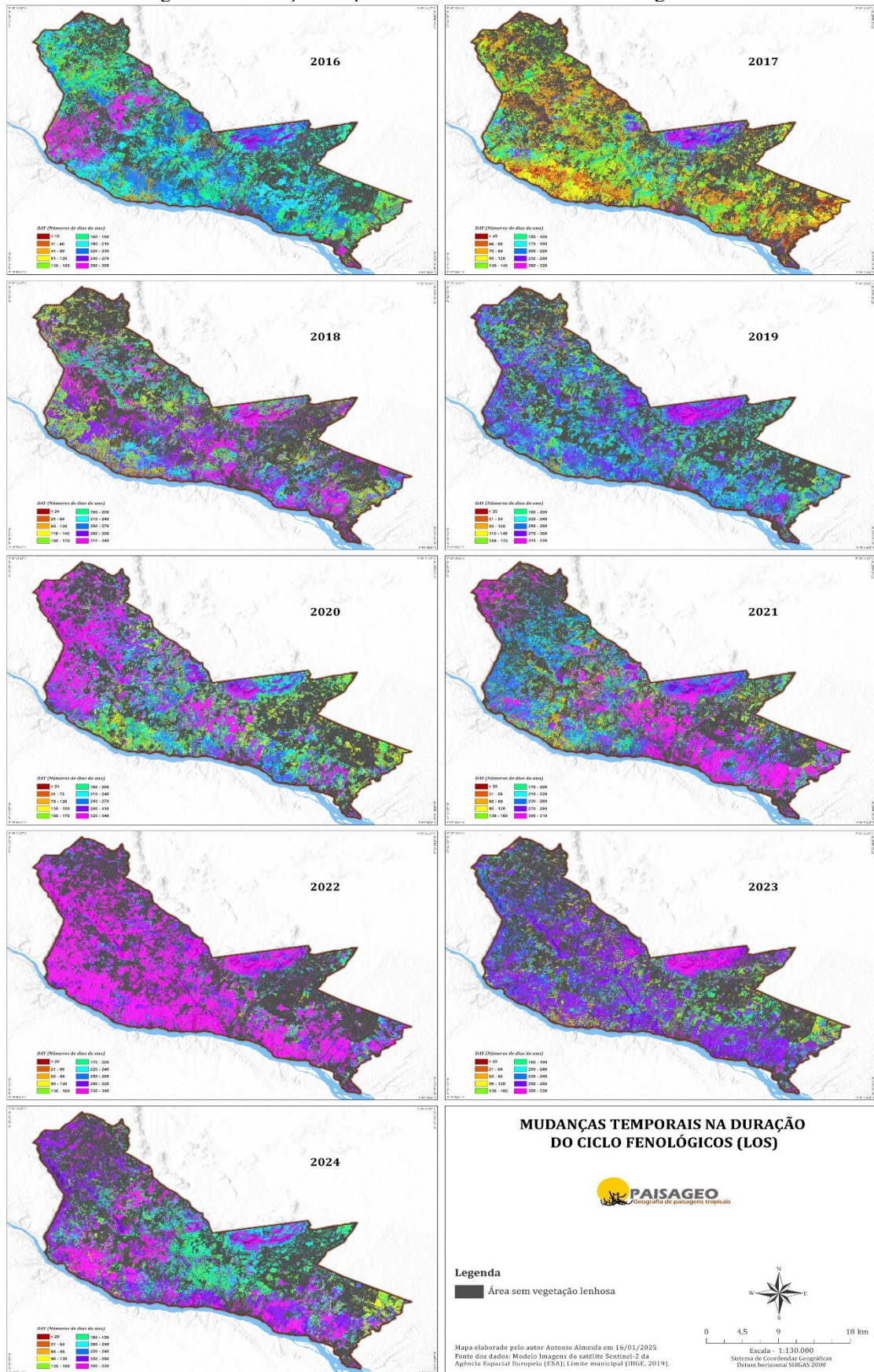
Figura 83 - Variação temporal das médias da métricas fenológica POS.



Fonte: O autor



Figura 84 - Variação temporal das médias da métrica fenológica LOS.



Fonte: O autor

Ao comparar os mapas anuais das métricas fenológicas entre 2016 e 2024, observa-se um padrão espacial claro de como o crescimento da vegetação têm sido alterados ao longo do tempo, em especial nas áreas impactadas por atividades humanas. A vegetação nessas regiões responde de maneira cada vez mais enfraquecida, apresentando ciclos fenológicos mais curtos e menos consistentes ao longo dos anos. Em contrapartida, as áreas menos impactadas, especialmente nos anos de maior precipitação, mantiveram um comportamento fenológico mais previsível e saudável, sobretudo em áreas de porte arbóreo denso.

#### 7.4 VARIABILIDADE INTERANUAL DAS MÉTRICAS FENOLÓGICAS

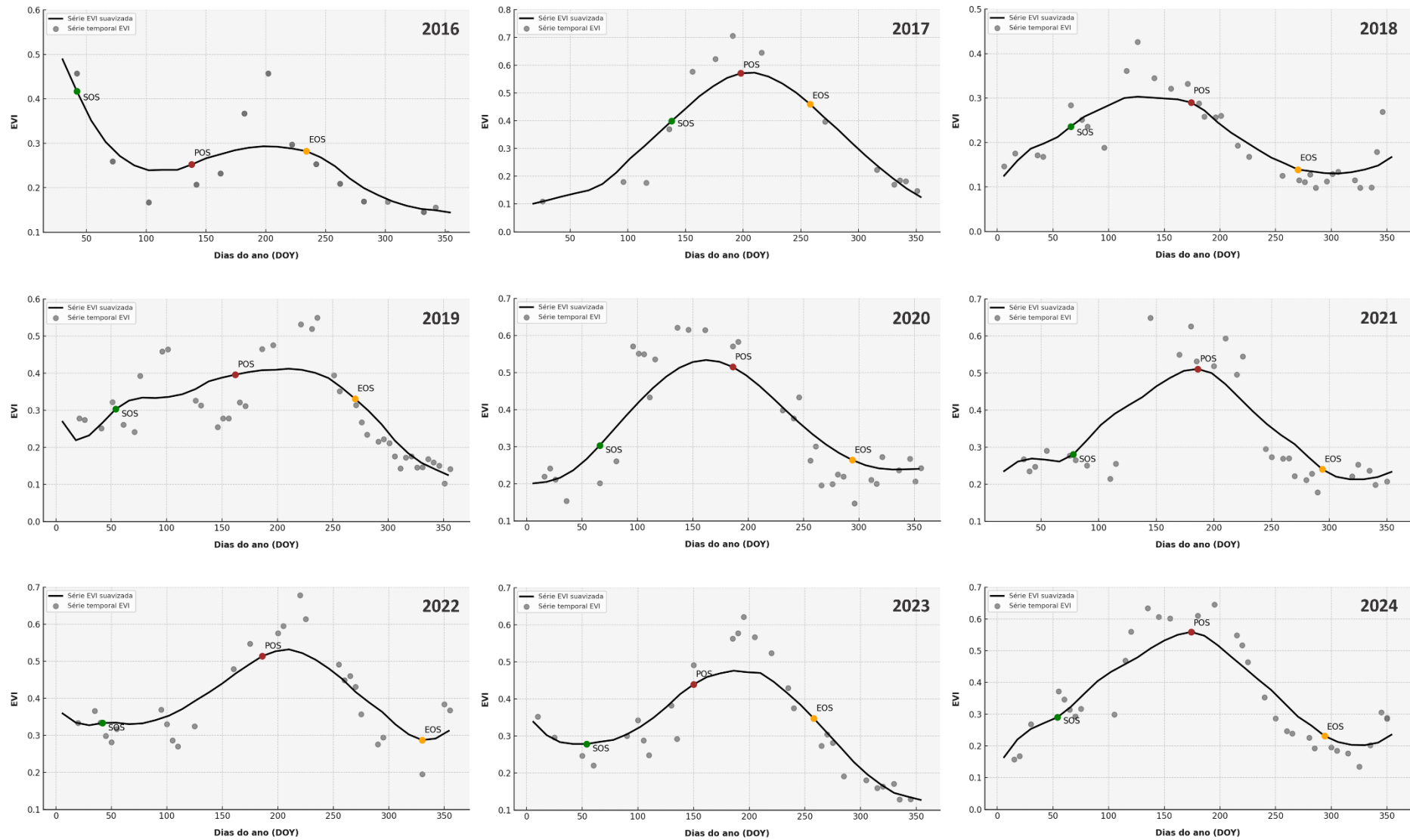
A análise da variabilidade interanual das métricas fenológicas da vegetação da Caatinga mostra a contribuição combinada dos elementos climáticos e antropogênicos ao ciclo de crescimento. O regime de chuvas é o fator decisivo no desempenho dessas fenofases e confirma tanto a adaptação da vegetação da caatinga às condições de semiaridez quanto a sua sensibilidade à variabilidade hídrica (Medeiros et al., 2022; Jesus et al., 2021; Godoy-Veiga et al., 2021; Gutiérrez et al., 2014).

Assim, nos anos chuvosos, como 2020, 2022 e 2024, a vegetação revela um ciclo fenológico mais longo e produtivo, exemplificado por SOS antecipado e LOS estendido. Observa-se, que nesse período, a vegetação desfrutou melhor uso de recursos hídricos, o que resultou em um maior acúmulo de biomassa, implicando em um EOS mais tardio.

Por outro lado, anos que apresentam menores quantidade precipitação, como ocorrido em 2017 e 2019, apresentam claramente os efeitos das perturbações antrópicas e climáticas, com um SOS e um EOS que ocorrem mais cedo e reduzem a duração do ciclo de crescimento, o que por sua vez afeta a regeneração e a produtividade da vegetação.

Além disso, estudos avaliam que os fatores humanos também podem ser considerados condicionantes pela produtividade vegetal e a dinâmica ecológica (Silva et al., 2022; Ribeiro et al., 2015; Melo et al., 2017; Araujo et al., 2017; Araujo et al., 2022). Afinal, nos anos em que a alteração é maior, as áreas degradadas têm dificuldade para responder da mesma forma que as áreas preservadas, o que as torna mais suscetíveis. A variação do ciclo de crescimento vegetação é facilmente identificada mediante as curvas fenológicas, apresentada na **figura 85**, que ilustram o comportamento da vegetação ao longo dos anos.

Figura 85 - Variação temporal das curvas fenológicas da área de estudo



Fonte: O autor

A figura acima demonstra que as curvas fenológicas de 2016 a 2024 apresentaram um padrão claro de variação do comportamento da vegetação da Caatinga ao longo dos dias do ano (DOY). Com base nos EVI suavizados, essas curvas descrevem detalhadamente os principais eventos fenológicos (SOS, POS e EOS), conforme abordado por (Medeiros, et al., 2022; Ramos et al., 2023; Caparros-Santiago e Rodriguez-Galiano, 2021; Bolton et al., 2020).

Nota-se que nos anos de 2016 e 2019, o SOS ocorre de forma mais precoce no ano antes do  $\pm 50$  DOY, indicando início antecipado do ciclo vegetativo. Isso provavelmente reflete a ocorrência de chuvas mais regulares e favoráveis. Por outro lado, nos anos de 2017, 2020 e 2021, o SOS se move relativamente para mais tarde, indicando atraso no início da estação. Essa variação pode ser associada a períodos de seca prolongados ou, até mesmo, fenômenos de perturbações induzidos, impactando, assim, a resposta inicial da vegetação.

A variação considerável do SOS para os anos de 2016 e 2021, apresenta valores entre  $\pm 46$  e  $\pm 81$  DOY, respectivamente, reflete a sensibilidade da vegetação da Caatinga. Isso, portanto, verifica a sensibilidade das condições climáticas e possíveis impactos relacionados, alterando, assim, o padrão da sazonalidade da precipitação e do acesso à água na vegetação. O POS também variou significativamente ao longo dos anos. Nos anos de 2017 e 2020, o POS ocorre precocemente entre  $\pm 150$  e  $\pm 200$  DOY, indicando que a vegetação atingiu seu pico de crescimento rapidamente. Já em anos como 2022, o POS tarda, refletindo uma estação de crescimento mais prolongada, mostrando que a vegetação possui um ciclo de vida mais equilibrado.

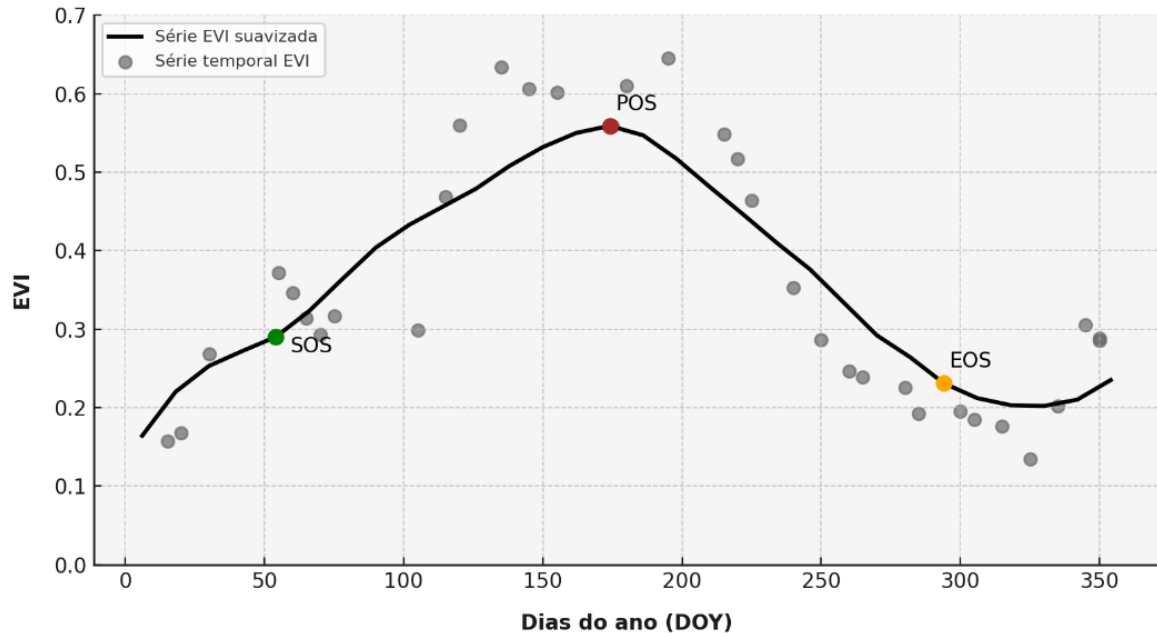
O EOS ocorre semelhantemente. Para o ano de 2016, 2017 e O EOS ocorre mais cedo, entre  $\pm 250$  e  $\pm 300$  DOY, o que pode indicar um ciclo vegetativo mais curto, devido à restrição hídrica ou esgotamento de recursos. No entanto, para 2020 ou 2022, o EOS ocorre muito mais tarde, após  $\pm 300$  DOY, indicando um ciclo de crescimento mais longo, devido a uma maior quantidade de água disponível ou temperatura mais favorável para o crescimento.

As análises das curvas, com uma tendência geral de elevação de  $\pm 232$  DOY em 2016 para  $\pm 333$  DOY em 2022, reflete uma resposta vegetativa mais elevada. O que pode ter sido impulsionado por práticas de manejo ou condições climáticas mais favoráveis. No entanto, no ano de 2023, o valor cai para  $\pm 258$  DOY, refletindo um ciclo de crescimento mais curto.

Complementando a análise temporal do comportamento fenológico da vegetação da Caatinga, já evidenciado pelas curvas fenológicas, as observações de campo realizadas ao longo de 2024 oferecem uma validação empírica do modelo fenológico LSP, reforçada pela curva fenológica específica desse ano (**Figura 86**). Nesse período, as métricas estimadas indicaram

um SOS médio em 26 de fevereiro (DOY 57), POS em 23 de junho (DOY 175) e EOS em 18 de outubro (DOY 292), refletindo um ciclo vegetativo mais equilibrado e prolongado.

Figura 86 - curva fenológica da área de estudo no ano de 2024.

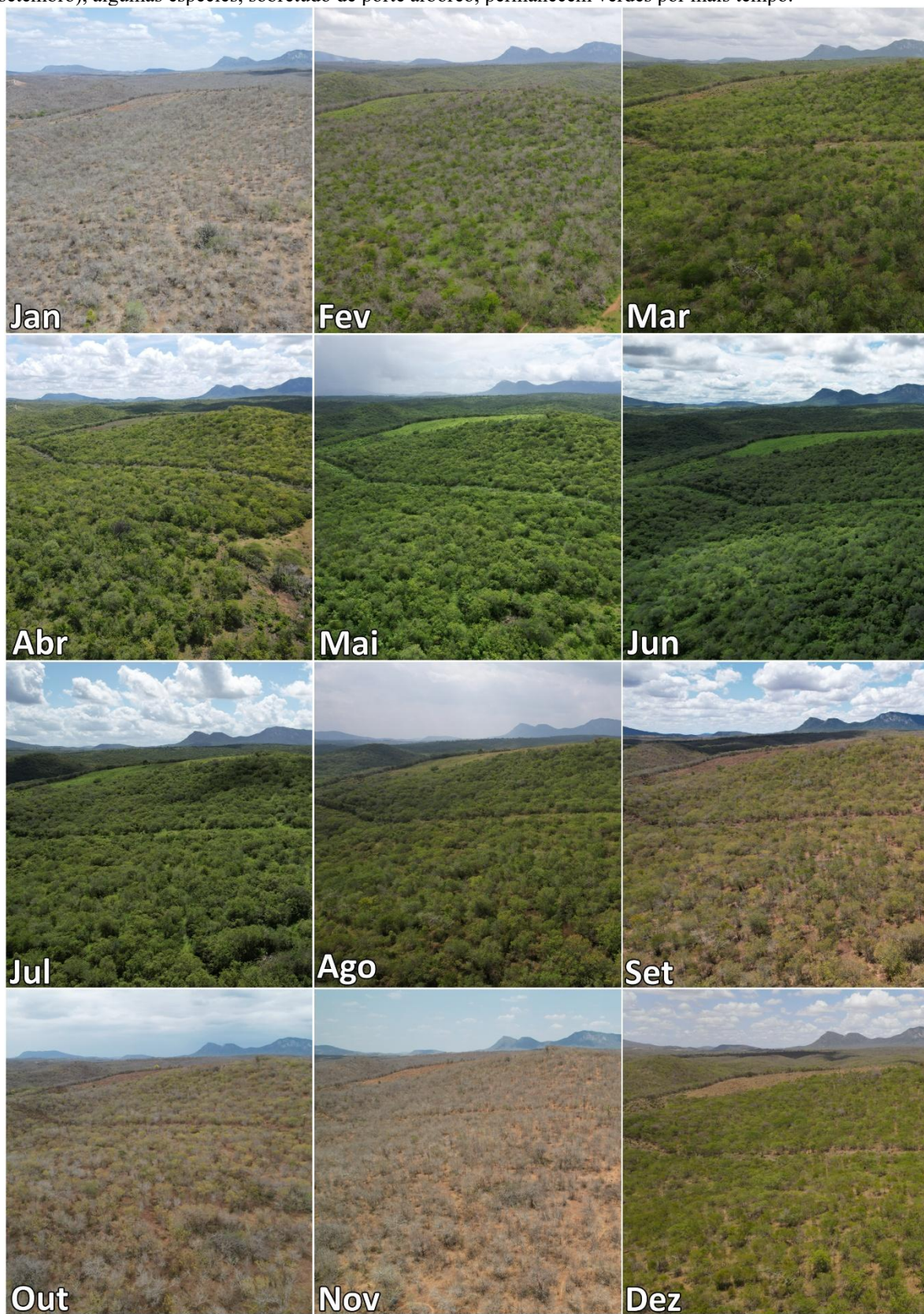


Fonte: Elaborada pelo autor

Esse comportamento indica um retorno a condições mais favoráveis, com início precoce da brotação, maior vigor vegetativo nos meses úmidos e senescência mais tardia. As imagens registradas ao longo de 2024 (**Figuras 87, 88 e 89**) reforçam esse padrão, evidenciando nas diferentes tipologias, os estágios fenológicos estimados pelo modelo LSP.

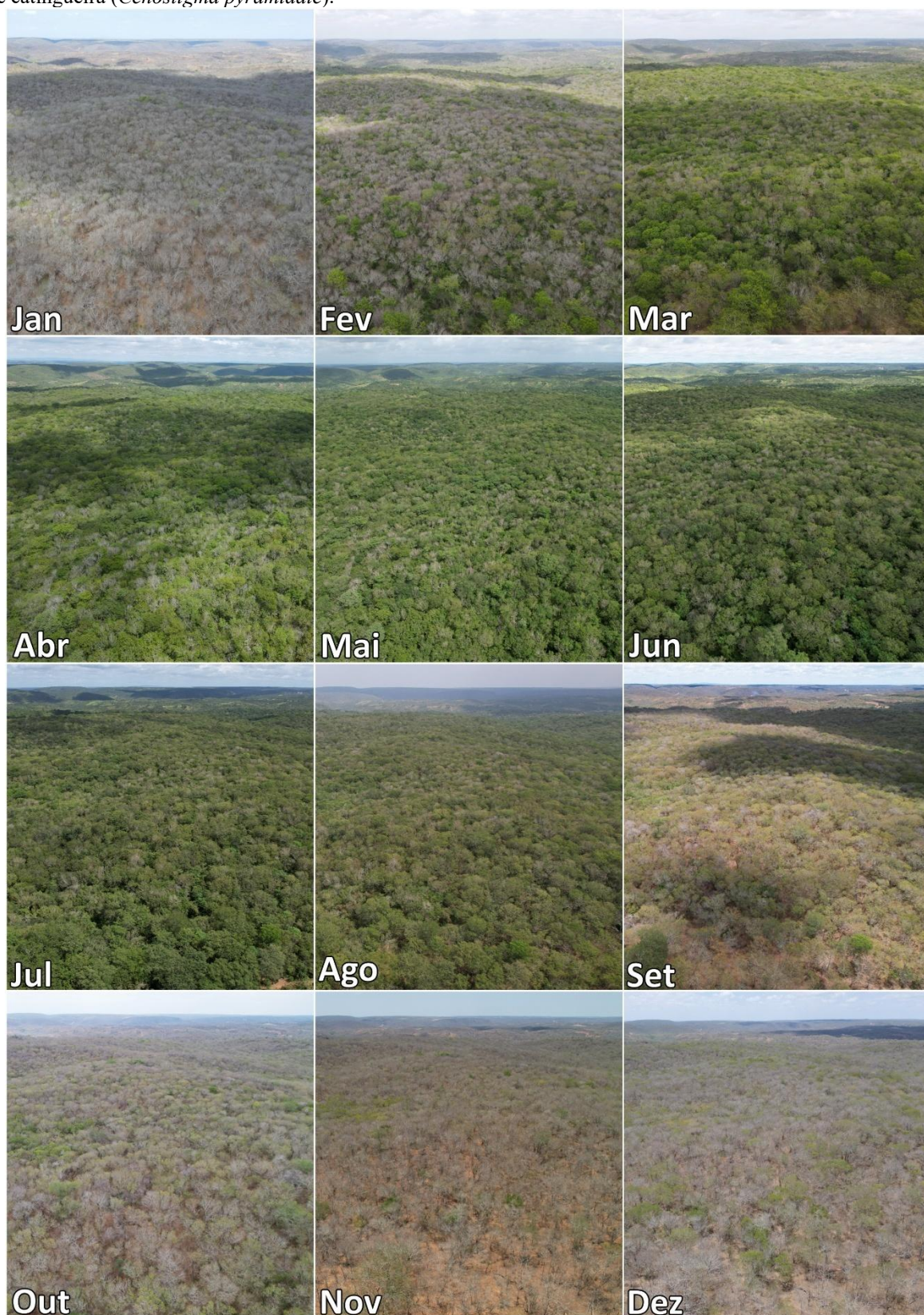
A correspondência entre as métricas médias e as observações em campo valida a consistência do modelo, demonstrando sua eficácia em representar a dinâmica sazonal da Caatinga. Cada fotografia ilustra momento-chave do ciclo fenológico, capturando os estágios de brotamento, máximo desenvolvimento vegetativo e senescência, confirmando os padrões detectados por sensoriamento remoto.

Figura 87 - Dinâmica sazonal da vegetação da Caatinga ao longo dos meses de 2024, evidenciando diferentes estados fenológicos das tipologias arbóreas e arbustivas abertas. Observa-se que, durante o fim o ciclo vegetativo (setembro), algumas espécies, sobretudo de porte arbóreo, permanecem verdes por mais tempo.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 88 - Dinâmica fenológica da Caatinga Arbórea Aberta ao longo de 2024. As imagens evidenciam o gradativo processo de brotação, expansão foliar e senescência da vegetação lenhosa. Em fevereiro, observa-se um retardo fenológico atípico provocado por uma infestação de lagartas, com impacto mais expressivo nas espécies de catingueira (*Cenostigma pyramidale*).



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 89 - Dinâmica sazonal da fenologia em diferentes tipologias de vegetação ao longo dos meses de 2024, com destaque para vegetação da CAD ripária, com ênfase na presença da Craibeira (*Tabebuia aurea*) no terraço fluvial, espécies que sem mantem verde durante todo período, enfatizando sua adaptabilidade ambientes com sazonalidade hídrica, suportando períodos de seca graças ao seu sistema radicular profundo.



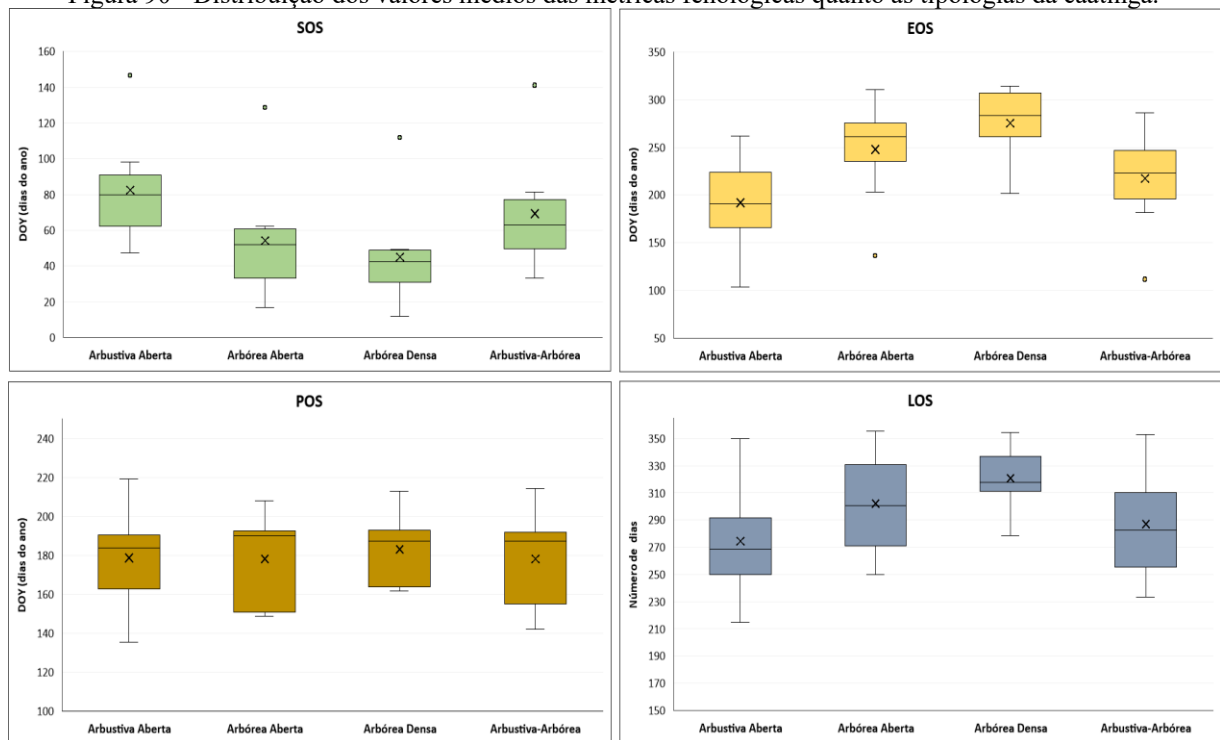
Fonte: Elaborada pelo autor



## 7.5 DINÂMICA SAZONAL DAS MÉTRICAS FENOLÓGICAS EM DIFERENTES TIPOLOGIAS

Com base na comparação das métricas fenológicas, pode-se descrever como diferentes tipologias da Caatinga respondem à perturbação antrópicas e às condições ambientais (**Figura 90**). Formações lenhosas mais arbóreas e bem cobertas, como CAD, com mais cobertura do solo e resistência, tem uma estação de crescimento mais longa e estável, com a capacidade de acumulação de biomassa (Jesus et al., 2021; Poloschi et al., 2020; Rossato et al., 2009). Tipologias mais abertas e arbustivas, com mais sistemas radiculares rasos, têm maior sensibilidade a` variação sazonal, levando a ciclos mais curtos e instáveis (Arnan et al., 2022; Araujo et al., 2023; Rossato et al., 2009).

Figura 90 - Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto as tipologias da caatinga.



Fonte: Elaborada pelo autor

A métrica SOS destaca o início precoce do ciclo de crescimento na CAD, em torno do  $\pm 60^\circ$  dia do ano (DOY), refletindo sua capacidade de reter umidade e iniciar a fotossíntese rapidamente após as primeiras chuvas (Medeiros et al., 2022; Jesus et al., 2021). A CAA segue, com SOS por volta do  $\pm 85^\circ$  DOY, indicando menor eficiência em iniciar o crescimento tão cedo quanto a CAD. Já as formações mais abertas, como a CAra, apresentam SOS mais tardio, próximo ao  $\pm 90^\circ$  DOY, resultado de sua menor retenção de água e maior exposição às condições

adversas (Fang et al., 2023; Poloschi et al., 2020). A CArAA apresenta uma variação significativa no SOS, entre  $\pm 20$  e  $\pm 120$  DOY, dependendo das pressões ambientais.

O POS também evidencia diferenças relevantes entre as tipologias. A CAD atinge o pico vegetativo mais tarde, por volta do  $\pm 200^\circ$  DOY, sustentando uma estação de crescimento prolongada que maximiza o uso de recursos hídricos acumulados. Em contraste, a CArA alcança o POS mais cedo, por volta do  $\pm 180$  DOY, mas com maior variação, evidenciando sua instabilidade. Tipologias intermediárias como a CArAA têm POS por volta de  $\pm 185$  DOY, demonstrando características equilibradas, embora ainda suscetíveis a pressões ambientais.

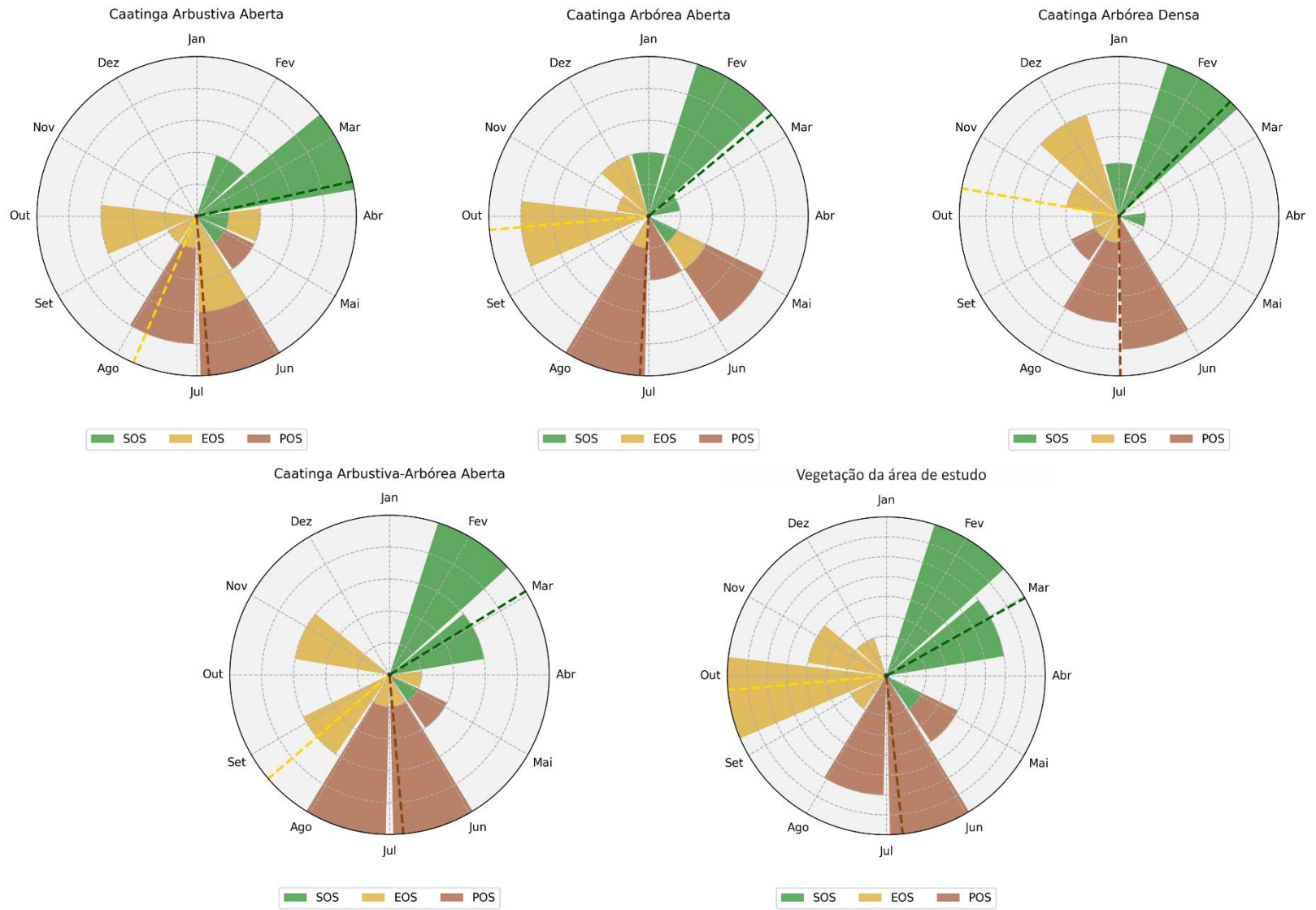
O EOS reforça as diferenças entre as tipologias. A CAD mantém a atividade fotossintética até cerca do  $\pm 275^\circ$  DOY, sendo a tipologia com o ciclo mais longo. Já a CArA encerra sua estação de crescimento muito antes, por volta do  $\pm 190$  DOY, indicando maior vulnerabilidade ao esgotamento dos recursos hídricos e às perturbações antrópicas. A CAA, com EOS entre  $\pm 225$  e  $\pm 250$  DOY, apresenta resiliência moderada, enquanto a CArAA reflete características intermediárias.

A métrica LOS destaca a resiliência das formações arbóreas. A CAD mantém o ciclo por cerca de  $\pm 300$  dias, enquanto a CArA tem um ciclo significativamente mais curto, em torno de 250 dias. As formações intermediárias (CAA e CArAA) apresentam LOS entre 270 e 290 dias, refletindo moderada estabilidade. Essas informações confirmam a vulnerabilidade acima mencionadas das áreas mais abertas as variações climáticas e pressões humana (Benítez et al., 2024; Stan e Sanchez-Azofeifa, 2019).

As métricas fenológicas sugerem que as perturbações como desmatamento, uso intensivo do solo e práticas agrícolas inadequadas alteraram significativamente as estruturas de ciclos fenológicos das formações lenhosas da Caatinga (Araujo et al., 2023; Ribeiro et al., 2015; Tabarelli et al., 2017). Áreas densas, como a CAD, são mais resistentes, enquanto as áreas abertas, como a CArA, apresentam de ciclos mais curtos e instáveis.

Essa diferenciação entre as formações também é corroborada pelos histogramas circulares das fenofases (**Figura 91**), que ilustram com clareza a distribuição sazonal das métricas fenológicas e a intensidade dos eventos ao longo do ano. Esses gráficos são ferramentas eficazes para compreender os padrões sazonais e entender as adaptações das espécies frente às condições ambientais e às pressões humanas (Morellato et al., 2010; Pabon-Moreno et al., 2019; Ivanov et al., 2022; Medeiros et al., 2022).

Figura 91 - Histogramas circulares das fenofases das tipologias da caatinga da área de estudo de 2016 a 2024



Fonte: Elaborada pelo autor

As formações arbóreas, como CAD e a CAA, demonstram ciclos fenológicos mais longos e estáveis. Ambas iniciam o SOS de forma precoce, com média em fevereiro, alcançam o pico vegetativo (POS) em junho, e encerram a estação produtiva (EOS) em meados de outubro, conforme indicado pelas linhas médias nos histogramas. A duração média do ciclo (LOS) reforça essa estabilidade, com valores superiores a 300 dias, indicando maior capacidade dessas tipologias em manter a produção de biomassa ao longo de grande parte do ano.

Em contraste, as formações arbustivas, como CArA, apresentam ciclos mais curtos e irregulares, com SOS mais tardio, média em março, POS entre julho e agosto e EOS antecipado em setembro. Essa menor estabilidade sugere maior sensibilidade a perturbações antrópicas e climáticas. A média da duração da estação (LOS) é de 283 dias, inferior às formações arbóreas, revelando uma maior sensibilidade a perturbações climáticas e antrópicas,

A CArAA, como tipologia intermediária, evidencia um comportamento híbrido. O ciclo se inicia entre janeiro e março, com POS em julho e EOS entre setembro e outubro, mantendo uma estabilidade relativa. Sua duração média da estação vegetativa, 286 dias, revela relativa estabilidade, ainda que com menor consistência que as formações puramente arbóreas.

Essa análise fenológica integrada reafirma a necessidade de conservação das tipologias arbóreas, que demonstram maior estabilidade ecológica e desempenham papéis fundamentais na manutenção dos processos funcionais do ecossistema. Por outro lado, as formações mais abertas, como CArA e CArAA, exige adoção de estratégias de manejo adaptativo sob risco crescente de degradação irreversível (Poloschi et al., 2020; Salomão et al., 2024; Magalhães et al., 2023).

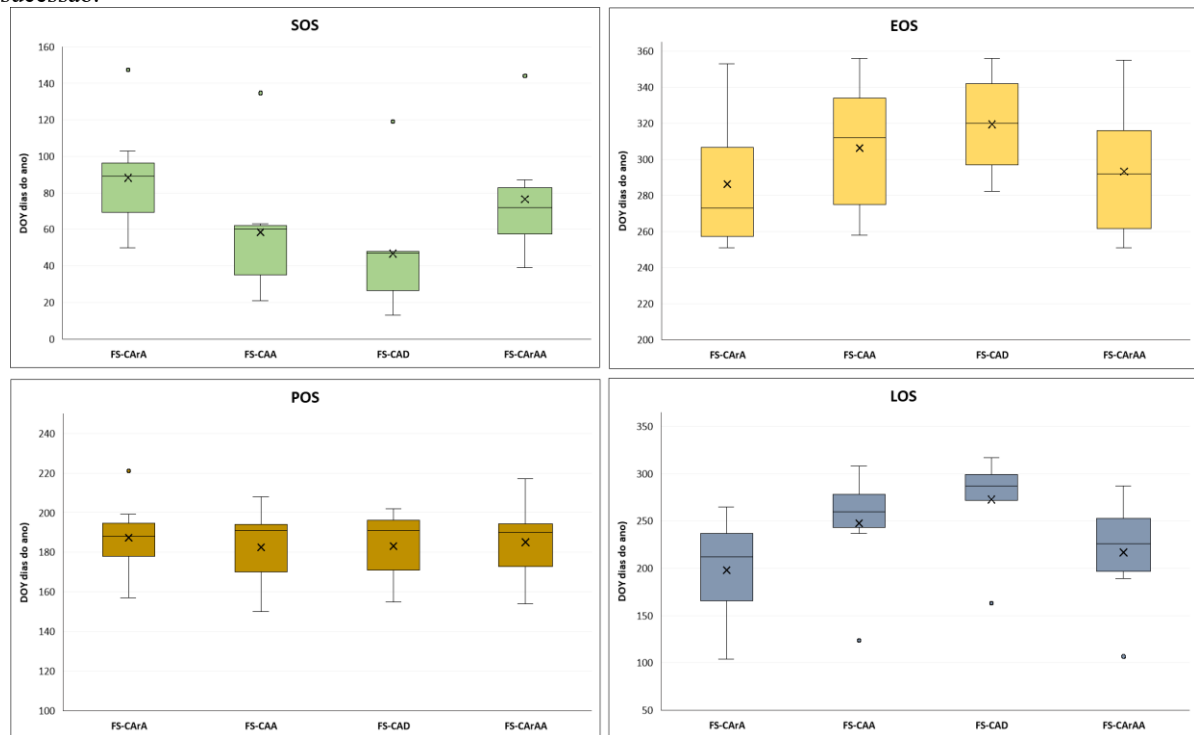
## 7.6 IMPACTO DAS PERTURBAÇÕES ANTRÓPICAS NOS ESTADOS DINÂMICOS NA CAATINGA

As perturbações antrópicas têm impacto direto sobre os estados dinâmicos da vegetação da Caatinga. Essas perturbações não alteram somente a estrutura da vegetação, mas também alteram seus processos ecológicos fundamentais, incluindo a fenologia (Londoño-Lemos et al. do ano, 2024; Stan et al. do ano, 2019; Ramos et al., 2023; Jara-Guerrero, et al., 2021). A análise das métricas fenológicas mostra que as tipologias da Caatinga reagem de maneira diferente às perturbações antropogênicas, em função de seus estados dinâmicos formados para sucessão, perturbação e estabilizado.

### 7.6.1 Estado de Sucessão

Os processos sucessionais na Caatinga variam conforme o tipo de vegetação e as condições locais, sendo amplamente influenciados por perturbações humanas e características ambientais específicas (Vandermeer et al., 2004; Norden et al., 2015). A composição de espécies e a estrutura da vegetação estão ligadas à cobertura florestal circundante e ao tempo de abandono do uso da terra. Áreas com maior cobertura florestal adjacente tendem a recuperar-se mais rapidamente, promovendo o acúmulo de espécies e a regeneração da vegetação (Pérez-Cárdenas et al., 2021).

Figura 92 - Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto o estado dinâmico formado por sucessão.



Legenda: CArA - Caatinga Arbustiva aberta; CAA – Caatinga Arbórea Aberta; CAD – Caatinga Arbórea Densa; CArAA – Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta; FS- Formado por Sucessão; EE – Estado Estabilizado; FP – Formado por Perturbação. Fonte: O autor

Nas tipologias arbóreas da Caatinga, como CAD e a CAA, observa-se uma regeneração resiliente e acelerada. A CAD apresenta um início precoce na SOS, entre  $\pm 40$  e  $\pm 50$  DOY, enquanto a CAA começa entre os dias  $\pm 50$  e  $\pm 60$  DOY. Isso está relacionado à capacidade adaptativa das espécies arbóreas ao responder às primeiras chuvas, impulsionando um rápido crescimento, como detalha Souza (2020). Além disso, a regeneração nas áreas melhora a

disponibilidade de nutrientes no solo, de modo que, constitui uma situação favorável para o desenvolvimento contínuo da vegetação (Carvalho et al., 2012; Carvalho et al., 2022).

A fase EOS também evidencia o estado formado por sucessão. A CAD mantém sua produtividade até  $\pm 330$ -340 DOY, enquanto a CAA finaliza entre  $\pm 300$ -320 DOY. Isso demonstra que a sucessão permite ciclos fenológicos mais longos, maximizando o período de crescimento.

Nas tipologias arbustivas, como a CArA e a CArAA, a sucessão é mais vulnerável a perturbações. Nessas áreas, o SOS ocorre entre os dias  $\pm 60$ -70 DOY, e o EOS é menos prolongado até  $\pm 290$ -300 DOY. Embora menos complexas estruturalmente, essas áreas conseguem aumentar a duração do ciclo fenológico por meio da regeneração de espécies pioneiras (Carvalho et al., 2012; Poloschi et al., 2020).

Espécies como *Mimosa hostilis* e *Cenostigma pyramidale* demonstram respostas adaptativas, com maior abundância em áreas de regeneração precoce e secundária avançada, respectivamente. Esses padrões sugerem que a sucessão não é limitada à substituição de árvores por arbustos, mas também inclui a dominância de árvores em formas arbustivas de caules múltiplos, refletindo estados sucessionais alternativos em paisagens de Caatinga alteradas pelo homem (Melo et al., 2017; da Silva e Barbosa, 2017).

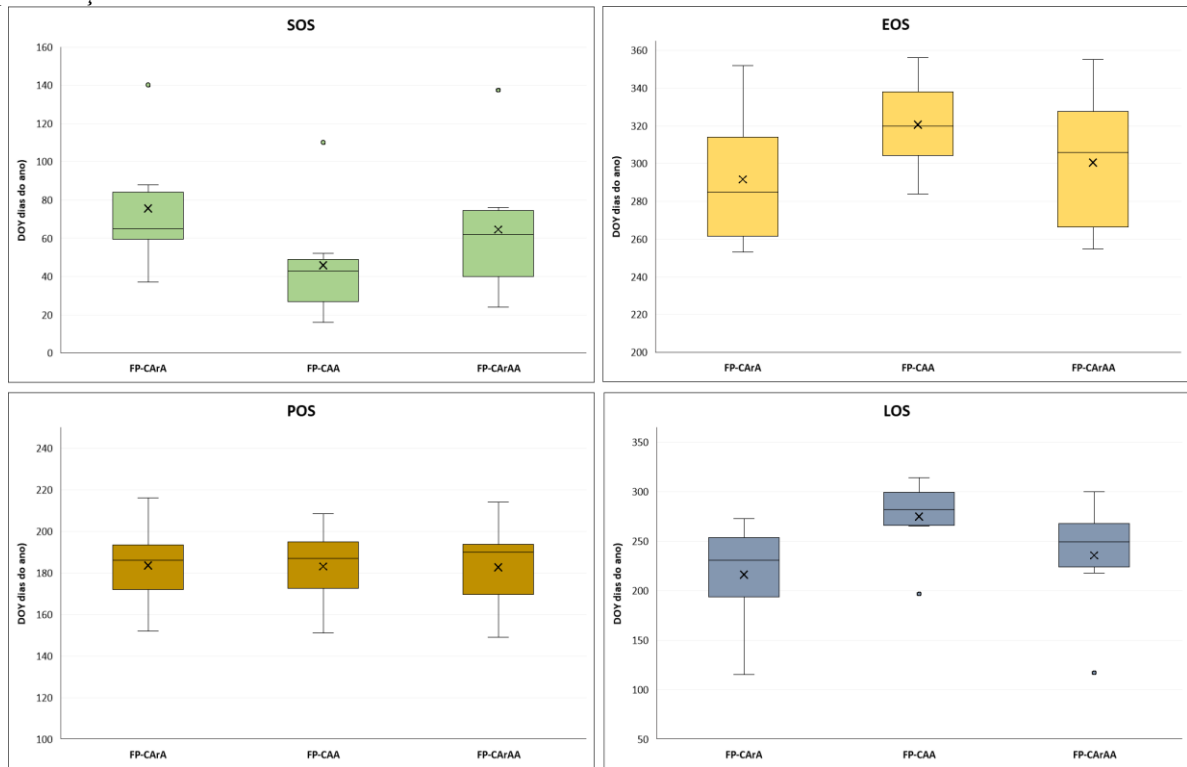
A métrica LOS destaca a eficiência da regeneração nas áreas arbóreas em sucessão. Nas tipologias arbóreas, variam de  $\pm 270$  a  $\pm 300$  dias, o que destaca a eficiência regenerativa dessas áreas. Em contrapartida, locais altamente perturbados apresentam acúmulo mais lento de espécies, ou ser dominados por espécies adaptadas a perturbações frequentes, resultando em trajetórias sucessionais alternativas (Arroyo-Rodríguez et al., 2017; Martínez-Ramos et al., 2016; Jakovac et al., 2016; Mesquita et al., 2015).

### 7.6.2 Estado de Perturbação

As perturbações alteram profundamente os ecossistemas, promovendo heterogeneidade espacial e temporal, de forma que áreas próximas a vetores de distúrbio sofrem maiores pressões antrópicas (Turner, 2010; Smith et al., 1997; Ribeiro et al., 2015).

Nas tipologias arbóreas (CAD e CAA), a exposição a perturbações resulta em um SOS tardio ( $\pm 60$ -80 DOY), prejudicando o início ideal do crescimento. O EOS ocorre mais cedo, reduzindo o ciclo produtivo anual. Na CAA, por exemplo, o EOS acontece por volta dos  $\pm 290$  DOY, comprometendo a capacidade de produção ao longo do ano.

Figura 93 - Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto o estado dinâmico formado por perturbação.



Legenda: CArA - Caatinga Arbustiva aberta; CAA – Caatinga Arbórea Aberta; CAD – Caatinga Arbórea Densa; CArAA – Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta; FS- Formado por Sucessão; EE – Estado Estabilizado; FP – Formado por Perturbação. Fonte: O autor

Nas tipologias arbustivas (CArA), o impacto é ainda mais severo. O SOS pode ultrapassar os  $\pm 80$  DOY, e o EOS é antecipado para antes dos  $\pm 280$  DOY, indicando ciclos de crescimento encurtados. Tais perturbações favorecem espécies tolerantes a distúrbios frequentes, promovendo homogeneização taxonômica (Ribeiro-Neto et al., 2016; Araujo, 2023).

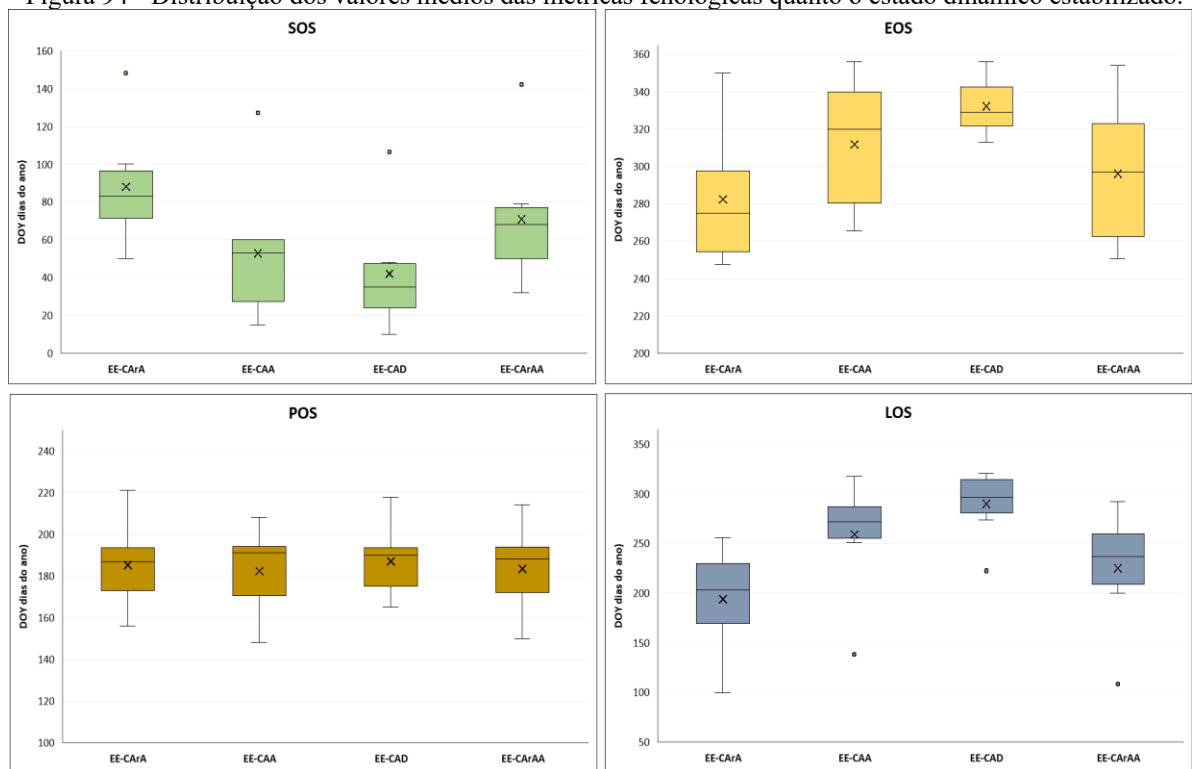
Espécies adaptadas a perturbações antrópicas, frequentemente associadas à vegetação aberta, expandem sua distribuição, dificultando a identificação de padrões naturais de vegetação (Araujo, 2023). Nessas áreas, a regeneração ocorre mais lentamente ou é dominada por espécies tolerantes a perturbações frequentes (Jakovac et al., 2016; Mesquita et al., 2015).

Sob essas condições, o LOS é drasticamente reduzido, chegando a menos de  $\pm 200$  dias nas áreas arbustivas perturbadas. Isso limita a sustentação de biodiversidade e biomassa, podendo levar à desertificação e degradação irreversível.

### 7.6.3 Estado Estabilizado

O estado estabilizado reflete um equilíbrio dinâmico alcançado após o estado de sucessão, com o ecossistema mantendo relativa constância em ciclos ecológicos e composição de espécies, mesmo frente a variações de curto prazo (Turner et al., 1993; Walker e Del Moral, 2009). Esse processo é visível nas tipologias e está associada a um ciclo fenológico que, embora não ideal, mantém-se relativamente estável.

Figura 94 - Distribuição dos valores médios das métricas fenológicas quanto o estado dinâmico estabilizado.



Legenda: CArA - Caatinga Arbustiva aberta; CAA – Caatinga Arbórea Aberta; CAD – Caatinga Arbórea Densa; CArAA – Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta; FS- Formado por Sucessão; EE – Estado Estabilizado; FP – Formado por Perturbação. Fonte: O autor

Nas áreas arbóreas (CAD e CAA), o início da estação de crescimento (SOS) ocorre entre  $\pm 40$  e  $\pm 60$  DOY, enquanto o final da estação (EOS) se mantém entre  $\pm 310$  e  $\pm 320$  DOY. Embora menos dinâmico do que em estado de sucessão, o ciclo fenológico estabilizado reflete uma produtividade consistente e regular.

Porém, essa estabilidade é vulnerável a interferências humanas, como a extração constante de recursos, que frequentemente convertem áreas arbóreas em arbustivas. Esse processo altera a dinâmica ecológica e mascara a interação natural entre o clima e a cobertura vegetal, impactando negativamente o equilíbrio do ecossistema (Araujo et al., 2023).



Nas áreas arbustivas (CArA e CArAA), o estado estabilizado apresenta ciclos regulares, com o POS entre os dias  $\pm 180-190$  DOY. Contudo, o EOS tende a ocorrer mais cedo, por volta dos  $\pm 290$  DOY, refletindo uma leve compressão do ciclo fenológico. Nessas áreas, frequentemente sujeitas a perturbações, as comunidades vegetais permanecem em um ciclo de sucessão secundária contínuo, marcado por processos repetitivos de colonização e extinção de espécies (Lehtilä et al., 2016).

Esse padrão também é observado em tipologias arbóreas e sugere que áreas estabilizadas podem atingir um nível consistente de produtividade, embora de forma limitada. Contudo, a estabilidade ecológica é reduzida em áreas intensamente perturbadas, comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas em comparação com áreas mais preservadas (Câmara et al., 2019).

## 7.7 RESPOSTAS DE FATORES AMBIENTAIS NA LSP

A análise fenológica a partir da LSP é uma instrumental importante para monitoramento e análise das dinâmicas de vegetação, particularmente em ecossistemas semiáridos como a Caatinga, sensíveis a perturbações antrópicas frequentes (Ma et al., 2022; Medeiros et al., 2022). Através dela, é possível entender como as mudanças climáticas e antropogênicas afetam ciclos fenológicos, sazonalidade e produtividade da vegetação (Dronova e Tadde, 2022; Wolf et al., 2017; Schwieder et al., 2018). Sobretudo, tal ação têm implicações diretas nas dinâmicas fenológicas das tipologias arbóreas e arbustivas da Caatinga.

As diferenças nos estoques de biomassa e carbono são influenciadas por fatores como a irregularidade das precipitações, o estágio sucessional das áreas e as distintas fitofisionomias (Lima Junior et al., 2014). As formações vegetais mais densas e bem preservadas desempenham um papel crucial no armazenamento de carbono, principalmente por meio da acumulação de matéria orgânica no solo e da biomassa acima e abaixo do solo (Menezes et al., 2021; Castanho et al., 2020; Costa et al., 2014). Todavia, as áreas em degradação apresentam ciclos mais curtos, menores estoques de biomassa e carbono, onde estas estabelecem ao menos metade deles perdidos em projetos iniciais de sucessão. Isso indica que áreas preservadas acumularam, na média, o dobro de biomassa em relação às áreas em projetos iniciais de sucessão, caracterizado pela menor riqueza de espécies em seus estratos (Souza et al., 2019; Nascimento et al., 2022).

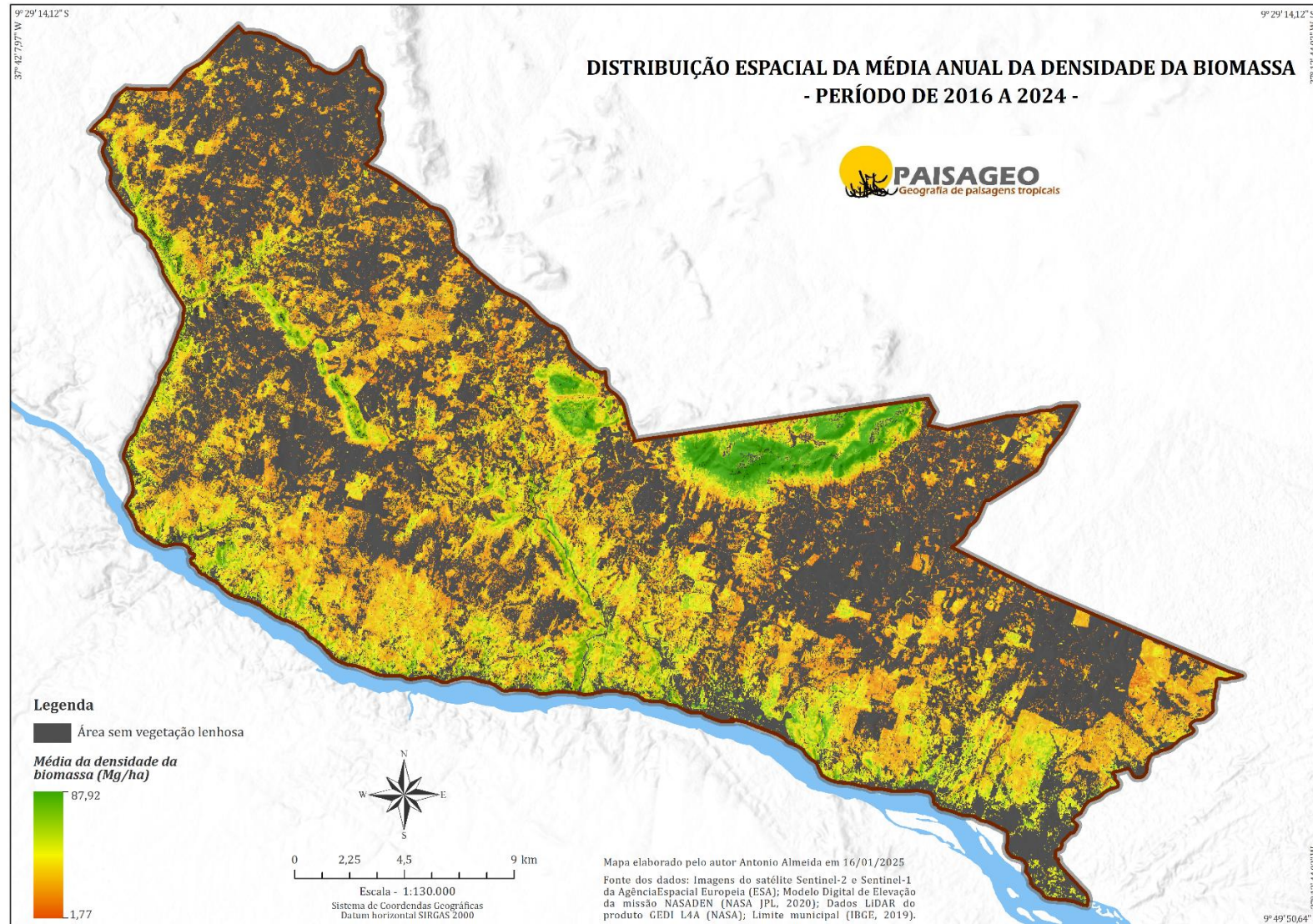
Os principais fatores ambientais abordados nesta análise são: densidade de biomassa acima do solo (AGBD)<sup>2</sup> (**Figura 95**) e estoque de carbono<sup>3</sup> (**Figura 96**). Essas variáveis, dentre outras, foram escolhidas devida à sua importância para todos os processos ecológicos que afetam o ciclo fenológicos das plantas e, ao mesmo tempo, são indicativas das condições ambientais em áreas altamente impactadas pelas atividades humanas. Conforme apontado em diversas pesquisas de Poorter et al. (2016), Wiesmeier et al. (2019), Chaturvedi et al. (2017) e Conti et al. (2014).

---

<sup>2</sup> Expressa em megagramas por hectare (Mg/ha), onde 1 megagrama (Mg) equivale a 1.000 kg. Essa unidade de medida é utilizada para quantificar a massa total de matéria orgânica acumulada por unidade de área, no caso, por hectare (ha), que corresponde a 10.000 m<sup>2</sup>.

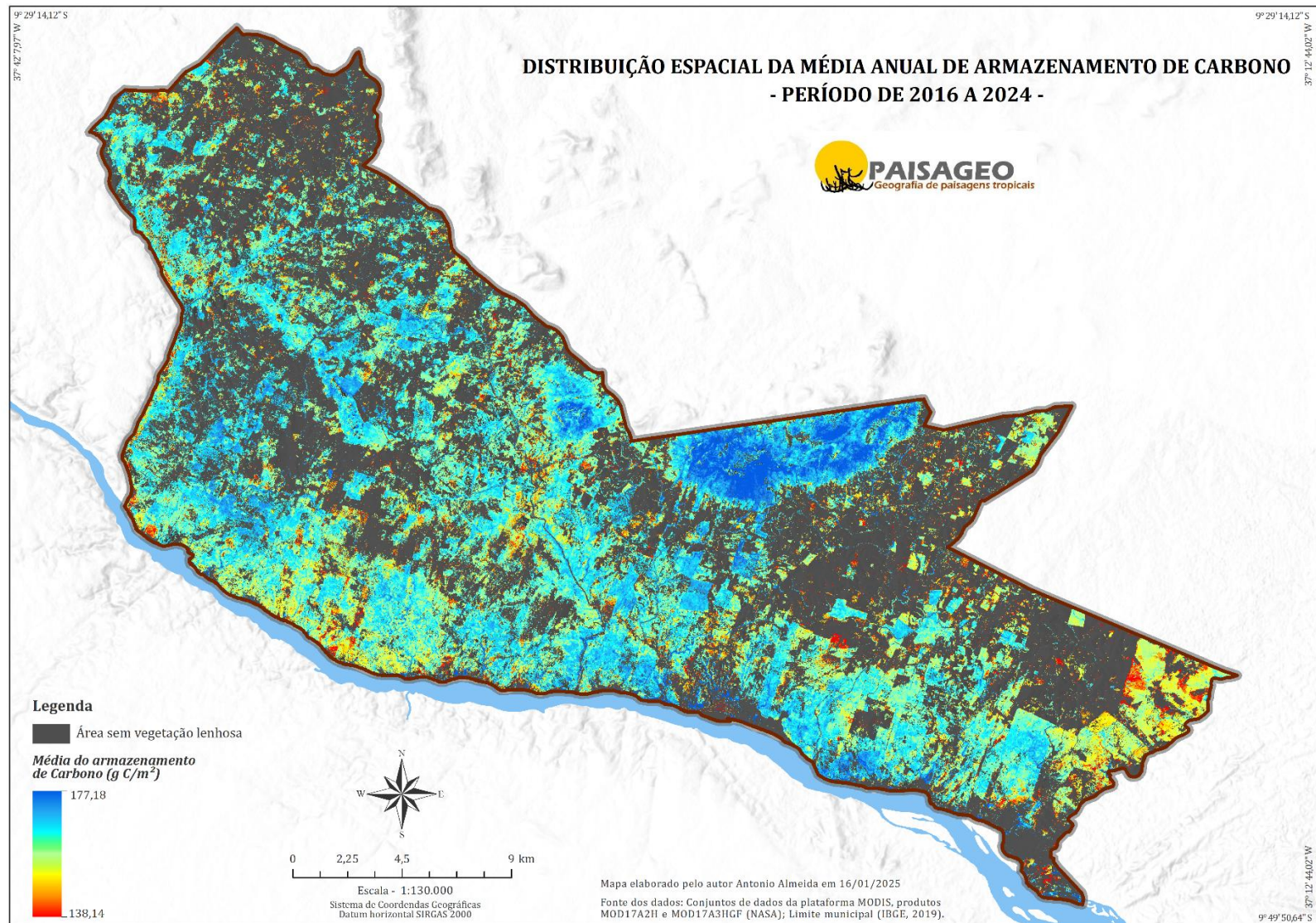
<sup>3</sup> Medido em gramas de carbono por metro quadrado (g C/m<sup>2</sup>). Essa unidade indica a quantidade de carbono sequestrado ou armazenado pela vegetação por unidade de área (m<sup>2</sup>).

Figura 95 - Distribuição espacial da média anual da densidade da biomassa acima do solo da caatinga lenhosa. O mapa destaca as áreas mais preservadas, em verde indicando maior densidade e associada a vegetação mais densa, e áreas mais impactadas, em laranja e vermelho e relacionada com menor densidade vegetal.



Fonte: O autor

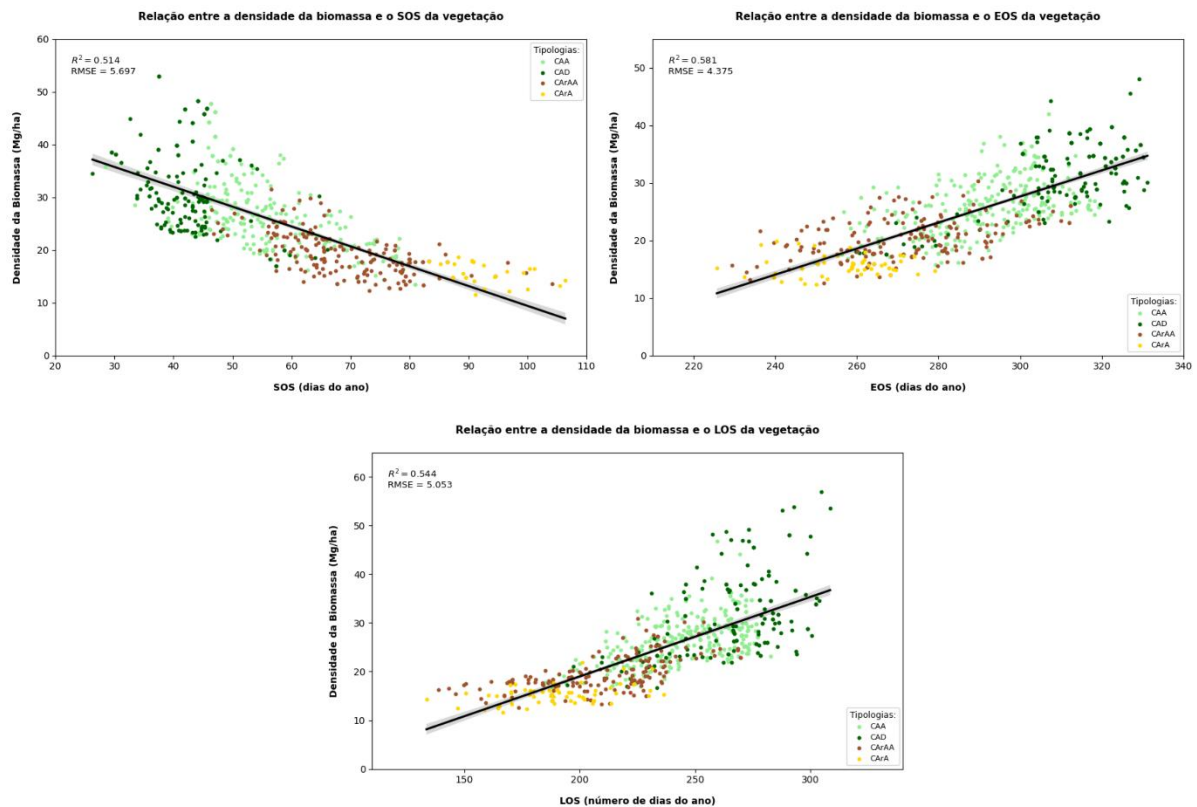
Figura 96 - Distribuição espacial da média anual do estoque do carbono da caatinga lenhosa. O mapa destaca as áreas de vegetação mais densa e maior capacidade de sequestro de carbono (cor azul), e áreas com menor estoque de carbono associadas a uma cobertura vegetal mais arbustiva e aberta (cor Amarelo e Vermelho).



Fonte: O autor

O padrão da correlação entre densidade de biomassa e métricas fenológicas anuais, como pode ser observado na **Figura 97**, lançaram alguns resultados interessantes sobre as tipologias da caatinga. Primeiro, o SOS mostrou uma correlação inversa com a densidade de biomassa ( $R^2 = 0,51$ ), sugerindo que áreas com início de estação mais tardio possuem menor densidade de biomassa, destacando-se tipologias arbustivas, como a CArA. Esse padrão reflete ambientes degradados, onde o crescimento da vegetação após perturbações é acompanhado de baixa acumulação de biomassa (Becknell et al., 2012; Poorter et al., 2016). No entanto, o EOS apresentou correlação positiva significativa com a densidade de biomassa ( $R^2 = 0,58$ ), indicando que áreas com maior densidade de biomassa, como em tipologias de CAD e CAA, sustentam ciclos mais longos e terminam suas estações de crescimento de forma mais tardia.

Figura 97 - correlação entre densidade de biomassa acima do solo e métricas fenológicas, nas tipologias da caatinga



Fonte: O autor

O comprimento da estação LOS mostrou correlação positiva com a densidade de biomassa ( $R^2 = 0,54$ ), reforçando que áreas de tipologias mais densas, como a CAD, sustentam ciclos fenológicos mais longos e acumulam mais biomassa. Em contraste, áreas abertas, como a CArA, exibem ciclos curtos, evidenciando condições de maior impacto humano e menor resiliência. Esse padrão reforça a interpretação de que regiões com menor interferência humana

sustentam uma vegetação mais resiliente e com maior capacidade de armazenamento de nutrientes (Poorter et al., 2015).

A imagens a seguir ilustra a acumulação de biomassa no solo em uma área representativa da tipologia CAA, capturada em duas fases distintas do ciclo fenológico: o máximo desenvolvimento vegetativo (POS) e o estágio de senescência (EOS). Esta fotografia evidencia as variações na quantidade de matéria orgânica presente no solo ao longo do ciclo fenológico, destacando os processos de deposição e decomposição característicos de cada fase.

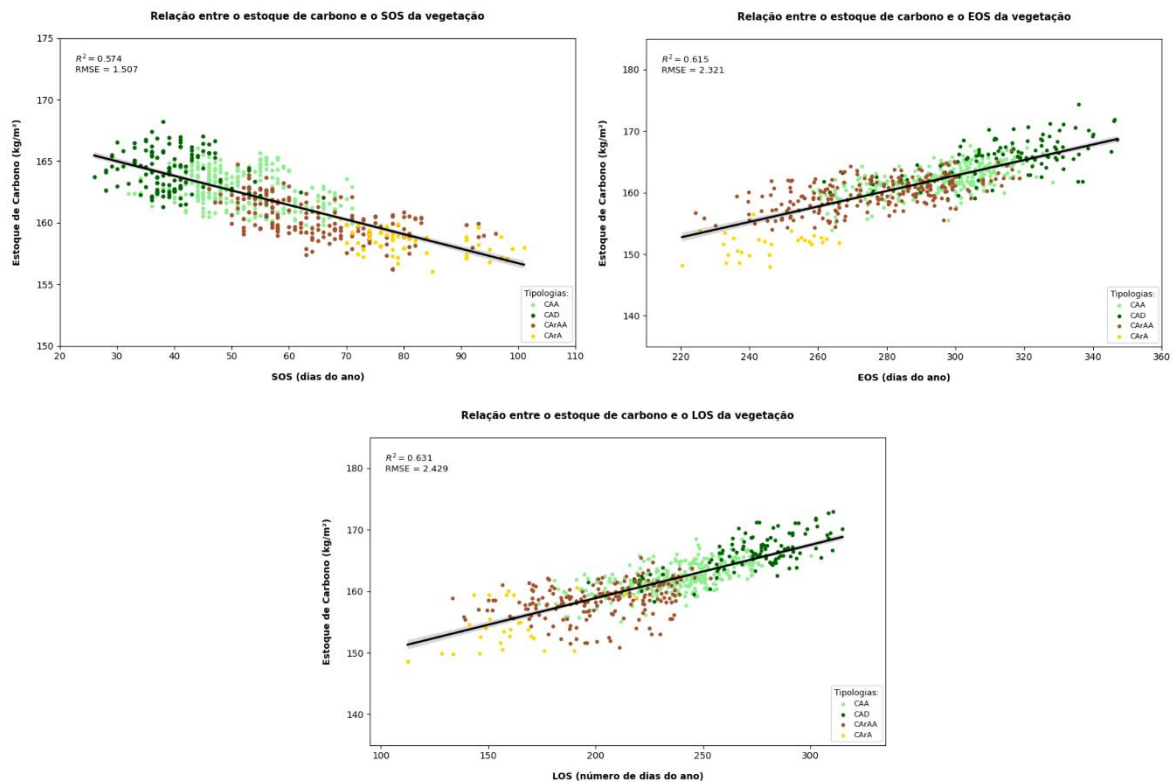
Figura 98 - Serrapilheira e biomassa acumulada no solo durante a fenofases POS e EOS em área de CAA.



Fonte: O autor

De maneira similar, a análise das relações entre o estoque de carbono e as métricas fenológicas trazem importantes padrões da resiliência e saúde da vegetação (**Figura 99**). Para o SOS, apresenta uma tendência negativa em relação ao estoque de carbono ( $R^2 = 0,57$ ), evidenciando conforme pesquisas, que áreas com início de estação menos precoce, como a CArA, refletem maior degradação e menor capacidade de estoque de carbono, frequentemente associadas a impactos antrópicos intensos, como desmatamento e uso intensivo do solo (Menezes et al., 2021; Sfair et al., 2018; Morais et al., 2017). Já o EOS apresenta forte correlação positiva com o estoque de ( $R^2 = 0,62$ ), demonstrando que áreas de CAD mostram maior acúmulo de carbono e apresentam ciclos de crescimento mais longos. (l., 2022).

Figura 99 - correlação entre estoque de carbono e métricas fenológicas, nas tipologias da caatinga



Fonte: O autor

Com relação ao LOS, os achados estão coerentes com pesquisas que indicam que a conversão de áreas florestais para uso do solo menos denso diminui o sequestro de carbono, prejudicando o desenvolvimento fenológico (Wei et al., 2014; Tiessen et al., 2003; Wick et al., 2000). Além disto, o LOS tem uma correlação positiva ( $R^2 = 0,63$ ) com o estoque de carbono, o qual confirma que tipologias com densidades mais altas têm maior resiliência de sequestro de carbono. Esta variabilidade é observada, por exemplo, nas áreas CArA e CArAA, com uma menor capacidade de sequestro, o que é possivelmente explicado pela fragmentação e atividade mais intensa.

As diferenças observadas nas métricas fenológicas e nos estoques de biomassa e carbono entre as tipologias refletem a interação entre os fatores ambientais e as perturbações humanas. Assim, tipologias arbóreas se destacam principalmente pela maior resiliência fisionômica, maior acumulação de biomassa e maiores ciclos fenológicos. Em contraposição, tipologias arbustivas, aprestam maior vulnerabilidade, sendo que seus ciclos são mais curtos e com menores estoques de carbono e biomassa, evidenciando os impactos antrópicos.

## 7.8 CONCLUSÃO

A análise evidenciou que as perturbações antrópicas exercem forte influência sobre os processos fenológicos e os estados dinâmicos das tipologias da Caatinga. A interação entre fatores climáticos e atividades humanas contribui para a definição de ciclos vegetativos mais curtos e irregulares, especialmente nas tipologias mais abertas e arbustivas, que demonstram menor estabilidade fenológica frente às pressões ambientais.

Essas mudanças são evidenciadas pelas métricas fenológicas, como o início (SOS), o término (EOS), o pico (POS) e a duração do ciclo vegetativo (LOS). De modo geral, áreas mais preservadas, como aquelas classificadas como CAD, apresentam maior resiliência, refletida em ciclos fenológicos mais longos e estáveis, além de uma maior capacidade de acumular biomassa. Em contraste, regiões impactadas por atividades humanas tendem a apresentar atrasos no SOS, antecipação do EOS e uma redução na LOS, o que evidencia a maior vulnerabilidade desses ambientes frente às perturbações.

Além disso, a análise por meio dos estados dinâmicos permitiu aprofundar a compreensão sobre como a vegetação responde às perturbações antrópicas ao longo do tempo. Esses estados refletiram diferentes trajetórias ecológicas, nas quais as tipologias arbustivas tendem a permanecer em estágios instáveis ou de recuperação lenta, enquanto as formações arbóreas demonstram maior capacidade de manter ou restabelecer a funcionalidade ecológica.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como proposta central compreender a dinâmica da vegetação lenhosa da Caatinga sob a influência de perturbações antrópicas crônicas e variações ambientais, utilizando sensoriamento remoto como principal ferramenta metodológica. Os objetivos inicialmente estabelecidos foram alcançados ao longo desta etapa, permitindo mapear e monitorar as mudanças da vegetação ao longo do tempo, avaliar os efeitos da estrutura da paisagem na fragmentação e conectividade dos remanescentes vegetais, investigar os processos sucessionais interrompidos e os estados dinâmicos das tipologias da Caatinga, analisar a produtividade da vegetação e sua resposta à precipitação, compreender os padrões fenológicos e a eficiência hídrica da vegetação associados aos diferentes estágios sucessionais.

A principal inovação deste trabalho reside na associação entre os processos de fragmentação, sucessão ecológica e funcionalidade fenológica, a partir de séries temporais orbitais e métricas ambientais integradas. Diferentemente de estudos anteriores, que abordavam a Caatinga sob perspectivas pontuais ou desarticuladas, esta pesquisa oferece uma visão sistêmica e espacialmente contínua dos padrões e processos que moldam a vegetação lenhosa. O conceito de estados dinâmicos foi implementado para interpretar a coexistência de tipologias distintas em mosaicos resultantes de diferentes níveis de perturbação e momentos de ocorrência, oferecendo uma abordagem original na compreensão da resiliência ecológica e degradação progressiva da Caatinga.

Em termos de avanço do conhecimento, a pesquisa caracterizou com detalhes os padrões espaciais da vegetação lenhosa da Caatinga a partir de uma abordagem integradora, que combinou análise de fragmentação, dinâmica de formações vegetais, resposta à disponibilidade hídrica e comportamento fenológico. A pesquisa revelou que a vegetação da Caatinga apresenta mosaicos de estágios sucessionais distintos, com tipologias mais abertas e fragmentadas tendendo a apresentar menor estabilidade nos padrões sazonais e maior sensibilidade à escassez hídrica, enquanto formações mais densas mantêm maior resiliência estrutural e funcional frente às oscilações climáticas.

Do ponto de vista metodológico, embora os resultados tenham sido satisfatórios, algumas limitações podem ser superadas em estudos futuros. A ampliação das séries históricas e a incorporação de dados hiperespectrais, como os sensores da constelação PlanetScope, representam oportunidades para refinar a análise fenológica e identificar variações espaciais em escala local com maior precisão da cobertura vegetal. A inclusão de dados LiDAR de alta

densidade, bem como o uso VANTs, pode oferecer dados de altíssima resolução para validação em campo e melhorar a calibração dos modelos, além de permitir análises estruturais detalhadas da vegetação. Sugere-se, também, que futuras pesquisas explorem a integração de informações socioeconômicas e o histórico de uso da terra em alta resolução, além do uso de modelagem espacial preditiva para estimar trajetórias de regeneração ou degradação.

As contribuições deste estudo para o mapeamento e monitoramento da Caatinga são expressivas. A proposta metodológica de classificar a vegetação lenhosa com base em estados dinâmicos ecológicos e sua relação com perturbações antrópicas constitui um modelo replicável, capaz de gerar diagnósticos mais precisos sobre o grau de conservação ou degradação das formações vegetacionais. O uso de índices como EVI, modelos de eficiência hídrica (RUE), análise fenológica (LSP) e algoritmos de aprendizado de máquina (Random Forest) reforça o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta robusta para subsidiar o planejamento ambiental.

Um dos avanços significativos da pesquisa foi a implementação de um conjunto de ferramentas interativas desenvolvidas no ambiente Google Earth Engine (GEE), concebidas para ampliar o acesso, a aplicabilidade e a replicabilidade dos resultados obtidos. Quatro plataformas foram elaboradas como produtos aplicados da tese, todas apresentadas no **Apêndice D**: o Aplicativo D.1 – CaatingaClass, destinado à classificação automatizada das tipologias da Caatinga, com base em aprendizado de máquina e variáveis estruturais; o Aplicativo D.2 – CaatingaTrend, voltado à análise de tendências da vegetação lenhosa, com base em séries temporais do EVI e nos testes estatísticos de Mann-Kendall e Theil-Sen; o Aplicativo D.3 – CaatingaHidro, focado na avaliação da resposta hidrovegetacional da vegetação, integrando métricas de produtividade e variáveis hidrológicas; e o Aplicativo D.4 – CaatingaFeno, desenvolvido para o monitoramento fenológico automatizado da vegetação, com base nas métricas do modelo Land Surface Phenology (LSP). Essas plataformas ampliam o alcance prático da pesquisa, oferecendo suporte direto a ações de gestão, conservação e planejamento ambiental em áreas semiáridas.

Além disso, os resultados reforçam a necessidade de estratégias de manejo que conciliem conservação e uso produtivo da terra. Nesse sentido, os sistemas agroflorestais despontam como uma alternativa promissora para áreas em processo de degradação, ao aliar práticas agrícolas sustentáveis à recuperação da cobertura vegetal lenhosa. Por promoverem maior diversidade estrutural, ciclagem de nutrientes e sombreamento do solo, as agroflorestas

contribuem para a restauração ecológica e a resiliência da paisagem, especialmente em regiões semiáridas como a Caatinga.

Por fim, os resultados obtidos contribuem para a identificação de áreas prioritárias para restauração ecológica, para o monitoramento contínuo de tendências de fragmentação e degradação e para o estabelecimento de políticas públicas voltadas à mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e ao manejo sustentável. A metodologia proposta também se mostra aplicável a outras regiões semiáridas, fortalecendo o arcabouço científico sobre os processos ecológicos da Caatinga e aprimorando estratégias de conservação da vegetação.

## REFERÊNCIAS

AB’SÁBER, A. O Nordeste brasileiro e a teoria dos refúgios. In: SEMINÁRIO DE TROPICOLOGIA, 2002, Recife. Anais[...]. Recife: Trópico e Meio Ambiente, 2002. p. 35-61

AB’SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 1. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003, 151 p.

ABADE, Natanael Antunes et al. Comparative analysis of MODIS time-series classification using support vector machines and methods based upon distance and similarity measures in the Brazilian Cerrado-Caatinga boundary. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 12160-12191, 2015.

ABADE, Natanael Antunes. **Uso de séries temporais NDVI do MODIS para mapeamento da cobertura vegetal natural e exótica em uma região de transição cerrado-caatinga**. 2015. 70 f., il. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ADOLE, Tracy; DASH, Jadu; ATKINSON, Peter M. Uma revisão sistemática da fenologia da vegetação na África. **Ecological Informatics**, v. 34, p. 117-128, 2016.

AGARWAL, Sunny; SUCHITHRA, A. S.; SINGH, Surendra Pal. Analysis and interpretation of rainfall trend using Mann-Kendall's and Sen's slope method. **Indian Journal of Ecology**, v. 48, n. 2, p. 453-457, 2021.

AHMED, S. A.; N, Harishnaika. The geospatial modelling of vegetation carbon storage analysis in Google earth engine using machine learning techniques. **Earth Science Informatics**, v. 17, n. 5, p. 4131-4144, 2024.

AIRNS, J. Restoration, reclamation and regeneration of degraded or destroyed ecosystems. In: SOULÉ, M.E. (Ed.) *Conservation Biology: The science of scarcity and diversity*. Sinauer Associates, INC. Publishers. 1986. p

ALAVI, Niloofar; KING, Douglas. Evaluating the relationships of inter-annual farmland vegetation dynamics with biodiversity using multi-spatial and multi-temporal remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, p. 1479, 2020.

ALBA, Elisiane et al. Comparação entre algoritmos de aprendizado de máquina para a identificação de floresta tropical sazonalmente seca. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, p. 1-10, 2022.

ALEXANDER, Cici; DEÁK, Balázs; HEILMEIER, Hermann. Micro-topography driven vegetation patterns in open mosaic landscapes. **Ecological indicators**, v. 60, p. 906-920, 2016.

ALHARBI, Saif et al. Prediction of maize (*Zea mays* L.) population using normalized-difference vegetative index (NDVI) and coefficient of variation (CV). **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 6, p. 673-679, 2019.

ALI, Rawshan et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1855, 2019.

ALMALKI, Raid et al. Monitoring and mapping vegetation cover changes in arid and semi-arid areas using remote sensing technology: a review. **Remote Sensing**, v. 14, n. 20, p. 5143, 2022.

ALMEIDA, Ana Alice Rodrigues Dantas et al. Evaluation of LiDAR-derived river networks coarsening with spatial patterns preservation. **Computers & Geosciences**, v. 189, p. 105639, 2024.

ALMEIDA, André Quintão de et al. Relações empíricas entre características dendrométricas da Caatinga brasileira e dados TM Landsat 5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 306-315, 2014.

ALMEIDA, Cicero Lima; DE CARVALHO, Thayslan Renato Anchiêta; DE ARAÚJO, José Carlos. Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 279, p. 107705, 2019.

ALVES, D. S.; ESCADA, M. I. S.; PEREIRA, J. L. G.; LINHARES, C. A. Land use intensification and abandonment in Rondônia, Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.4. 2003.

ALVES, Jose Jakson Amâncio. Caatinga do Cariri paraibano. **Geonomos**, 2009.

ALVES, Jose Jakson Amâncio. Geoecologia da caatinga no semi-árido do Nordeste brasileiro. **CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 2, n. 1, 2007.

ALVITES, Cesar et al. High-resolution canopy height mapping: Integrating nasa's global ecosystem dynamics investigation (gedi) with multi-source remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 16, n. 7, p. 1281, 2024.

ANDRADE, Ádanna de Souza et al. Dinâmica da paisagem da bacia hidrográfica do Rio Marapanim, Pará, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 4, p. 395-405, 2020.

ANDRADE, J. M. de. **Classificação da cobertura do solo da caatinga: avaliação de abordagens em Machine Learning utilizando dados LandSat Mono e multitemporais**. 2021. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Centro de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2021.

ANDRADE, João et al. Evaluating single and multi-date Landsat classifications of land-cover in a seasonally dry tropical forest. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 100515, 2021.

ANDRADE, L. A.; OLIVEIRA, F. X.; NEVES, C. M. L.; FÉLIX, L. P. Análise da vegetação sucessional em campos abandonados no agreste paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 2, 2007.

ANDRADE-LIMA, D. The caatingas dominium. *Revista Brasileira de Botânica* 4: 1981, p.149-163.

ANDRADE-LIMA, D. Vegetação. In: ATLAS nacional do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1966. f. II-11.

ANDRADE NUNES, João Paulo et al. The impact of grazing on biodiversity and forest succession in the Brazilian dry forest region is constrained by non-equilibrium dynamics. **Science of The Total Environment**, v. 946, p. 174549, 2024.

ANDREN, Henrik. Corvid density and nest predation in relation to forest fragmentation: a landscape perspective. **Ecology**, v. 73, n. 3, p. 794-804, 1992.

ANDREN, Henrik. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. **Oikos**, p. 355-366, 1994.

ANTONGIOVANNI, Marina et al. Chronic anthropogenic disturbance on Caatinga dry forest fragments. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 10, p. 2064-2074, 2020.

ANTONGIOVANNI, Marina; VENTICINQUE, Eduardo M.; FONSECA, Carlos Roberto. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. *Landscape Ecology*, v. 33, p. 1353-1367, 2018.

AQUINO, Cláudia Maria Sabóia et al. Estudo da cobertura vegetal/uso da terra nos anos de 1987 e 2007 no núcleo de degradação/desertificação de São Raimundo Nonato--Piauí. **Ra'e Ga**, n. 25, p. 252-279, 2012.

AQUINO, Deodato do Nascimento et al. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, p. 420-429, 2018.

ARAUJO FILHO, João Ambrósio de; CARVALHO, Fabiano Cavalcante de; SILVA, Nilzemar Lima da. Fenología y valor nutritivo de follajes de algunas especies forrajeras de la Caatinga. **Agroforestería en las Américas** v. 9 (33-34) p. 33-37, 2002.

ARAUJO, Helder FP et al. Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 18440, 2023.

ARAUJO, Helder FP et al. Vegetation productivity under climate change depends on landscape complexity in tropical drylands. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 27, n. 8, p. 54, 2022.

ARNAN, Xavier et al. Individual and interactive effects of chronic anthropogenic disturbance and rainfall on taxonomic, functional and phylogenetic composition and diversity of extrafloral nectary-bearing plants in Brazilian Caatinga. **Oecologia**, p. 1-11, 2022.

ARROYO-RODRÍGUEZ, Víctor et al. Landscape-scale forest cover drives the predictability of forest regeneration across the Neotropics. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 290, n. 1990, p. 20222203, 2023.

ASNER, Gregory P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote sensing of Environment**, v. 64, n. 3, p. 234-253, 1998.

ASTANHO, Andrea DA et al. A close look at above ground biomass of a large and heterogeneous Seasonally Dry Tropical Forest-Caatinga in North East of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 92, n. 01, p. e20190282, 2020.

AUGSPURGER, Carol K. Seedling survival of tropical tree species: interactions of dispersal distance, light-gaps, and pathogens. **Ecology**, v. 65, n. 6, p. 1705-1712, 1984.

BAI, Yujie et al. Variation in ecosystem water use efficiency along a southwest-to-northeast aridity gradient in China. **Ecological Indicators**, v. 110, p. 105932, 2020.

BAI, Z. G. et al. Global assessment of land degradation and improvement 1. Identification by remote sensing. **Report**, v. 2008, 2008.

BAKKE, Ivonete Alves et al. SEED DISPERSAL, SEEDBANK, SEEDLING SURVIVAL, AND INITIAL GROWTH OF THREE CAATINGA TREES. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 1007-1016, 2020.

BAKKE, O.A; PEREIRA FILHO, J.M.; BAKKE, I.A.; CODÃO, M.A. Produção e utilização da forragem de espécies lenhosas da caatinga. In: GARIGLIO, M. A. et al. (Orgs.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

BALVANERA, Patricia et al. Social ecological dynamics of tropical secondary forests. **Forest Ecology and Management**, v. 496, p. 119369, 2021.

BARBOSA, H. A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região Nordeste do Brasil em 1982-1985**. 1999. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

BARBOSA, Humberto A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of arid environments**, v. 67, n. 2, p. 288-307, 2006.

BARBOSA, Humberto Alves et al. Assessment of Caatinga response to drought using Meteorat-SEVIRI normalized difference vegetation index (2008–2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, p. 235-252, 2019.

BARBOZA, Raynner Rilke D. et al. The role of game mammals as bushmeat in the Caatinga, northeast Brazil. **Ecology and Society**, v. 21, n. 2, 2016.

BARROS, Alexandre Hugo Cezar et al. **Climatologia do Estado de Alagoas**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos. Recife: Embrapa Solos, 2012.

BARROS, Maria Fabíola et al. Resprouting drives successional pathways and the resilience of Caatinga dry forest in human-modified landscapes. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118881, 2021.

BASTIAANSEN, W. G. M. et al. remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Part 1: Formulation*. **Journal of Hydrology**, 212-213, 198–212. 1998a

BASTIAANSEN, W. G. M., et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Part 2: Validation*. **Journal of Hydrology**, 212-213, 213–229. 1998b

BASTIAANSEN, Wim et al. Discussion of “Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy fluxes in south-central Nebraska” by Ramesh K. Singh, Ayse Irmak, Suat Irmak, and Derrel L. Martin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 136, n. 4, p. 282-283, 2010.

BASTIAANSEN, Wim GM et al. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.

BECKNELL, Justin M.; KUCEK, Lisa Kissing; POWERS, Jennifer S. Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis. **Forest Ecology and Management**, v. 276, p. 88-95, 2012.

BENÍTEZ, Ángel et al. Forest Disturbance Determines Diversity of Epiphytic Lichens and Bryophytes on Trunk Bases in Tropical Dry Forests. **Forests**, v. 15, n. 9, p. 1565, 2024.

BERDUGO, Miguel et al. Plant spatial patterns identify alternative ecosystem multifunctionality states in global drylands. **Nature ecology & evolution**, v. 1, n. 2, p. 0003, 2017.

BERTRAND, Georges. **Paisagem e Geografia Física Global: esboço metodológico**. Cruz, Olga (trad.) Cadernos de Ciências da Terra. São Paulo, USP-IGEOG, nº 43, 1972

BEUCHLE, René et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015.



BEVEN, Keith J.; KIRKBY, Michael J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological sciences journal**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BEZERRA, Ulisses Alencar. **Modelagem de evapotranspiração por sensoriamento remoto em florestas tropicais sazonalmente secas: desafios na representação do fluxo de calor sensível**. 2023. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2023.

BHASKAR, Radika et al. Response diversity and resilience to extreme events in tropical dry secondary forests. **Forest Ecology and Management**, v. 426, p. 61-71, 2018.

BOLTON, Douglas K. et al. Continental-scale land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 240, p. 111685, 2020.

BORGES, Elane Fiuza et al. Séries temporais de dados de Sensoriamento Remoto no estudo do comportamento fenológico no Polo de Desertificação de Jeremoabo-BA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 01, p. 443-464, 2022.

BRAGA, A. P. S. et al. Avaliação de classificadores basados em aprendizado de máquina para a classificação do uso e cobertura da terra no bioma caatinga. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 62, 2010.

BRAGA, Célia Campos. **Inter-relações entre padrões de índice de vegetação e de pluviometria no Nordeste do Brasil**. 2000. 129f. (Tese de Doutorado em Recursos Naturais), Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba – Brasil, 2000.

BRITO MORAIS, Ygor Cristiano et al. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585-599, 2017.

BRITO, M; FERREIRA, J; CUNHA-QUEDA, C; HICKEL, D; MOURÃO, I; MARQUES, G. **Agricultura Biológica, Vol I: Boas Práticas Agrícolas Para O Solo E Para O Clima**. 2021. Scientific Figure on ResearchGate. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/figure/Figura-51-A-sucessao-ecologica-e-ociclo-de-regeneracao-natural-de-uma-floresta-sao-a\\_fig4\\_351879270](https://www.researchgate.net/figure/Figura-51-A-sucessao-ecologica-e-ociclo-de-regeneracao-natural-de-uma-floresta-sao-a_fig4_351879270) >. Acesso 01 junho, 2024.

BRITO, Pedro et al. Avaliação da evapotranspiração estimada pelo MODIS e do balanço hídrico para a bacia do Pontal-Pernambuco. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 2866-2877, 2021.

BROICH, Mark et al. A spatially explicit land surface phenology data product for science, monitoring and natural resources management applications. **Environmental Modelling & Software**, v. 64, p. 191-204, 2015.

BROWN, M. E.; DE BEURS, K. M.; MARSHALL, M. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years. **Remote Sensing of Environment**, v. 126, p. 174-183, 2012.

BROWN, Molly E.; DE BEURS, Kirsten M. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2261-2271, 2008.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R. Développement rural dans la région semi-aride du Brésil: transformations récentes, défis et perspectives. **Revue Franco-Brésilienne de Geographe (on line)**, v. 19, n. 1, 2013.

CABRAL, George André de Lima; SAMPAIO, Everardo Valadares de Sá Barretto; SILVA, Jarcilene. Estrutura espacial e biomassa da parte aérea em diferentes estádios sucessionais de Caatinga, em Santa Terezinha, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 03, 2013.

CAMACHO, R. G. V. **Estudo fitofisiográfico da caatinga do Seridó: Estação Ecológica do Seridó**, RN. 2001. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CÂMARA, Talita et al. Anthropogenic disturbance and rainfall variation threaten the stability of plant-ant interactions in the Brazilian Caatinga. **Ecography**, v. 42, n. 11, p. 1960-1972, 2019.

CAMPOS, Suany et al. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 271, p. 398-412, 2019

CAO, Ruyin et al. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 244-257, 2018.

CAO, Sen; SANCHEZ-AZOFEIFA, Arturo. Modeling seasonal surface temperature variations in secondary tropical dry forests. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 62, p. 122-134, 2017.

CAPARROS-SANTIAGO, Jose A.; RODRIGUEZ-GALIANO, Victor; DASH, Jadunandan. Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 171, p. 330-347, 2021.

CAPOTONDI, Antonietta et al. Understanding ENSO diversity. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 6, p. 921-938, 2015.

CARDOSO, Phillipe Valente et al. Mapeamento de Áreas de Caatinga Através do Random Forrest: Estudo de caso na Bacia do Rio Taperoá. **Revista Geoaraguaia**, v. 11, n. Especial, p. 55-68, 2021.

CARREIRO, Gabriela Alves et al. Aplicação de Abordagem Metodológica para Proxy de Degradação da Terra Usando Amplitude Temporal do Índice Rain Use Efficiency–RUE–para os Biomas Cerrado e Caatinga no Brasil. **Espaço Aberto**, v. 12, n. 2, p. 265-288, 2022.

CARVALHO, Jullyanna Nair de et al. Native caatinga species for the recovery of degraded areas in the Brazilian semiarid region. **Revista Árvore**, v. 46, p. e4610, 2022.

CARVALHO, V. C. **Structure e dinâmica de la vegetation en milieu tropical semi-arido. A caatinga de Quixaba (PE): do terreno à análise de dados MSS/Landsat**. 1986. 332 f. Tese (Doctorat) - Université de Toulouse-Le Mirail e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, Toulouse/São José dos Campos, 1986.

CASTANHO, Andrea DA et al. A close look at above ground biomass of a large and heterogeneous Seasonally Dry Tropical Forest-Caatinga in North East of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 01, p. e20190282, 2020.

CASTRO, S. M.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; SATO, H. Effect of drought on productivity in a Costa Rican tropical dry forest. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 4, p. 045001, 2018.

CAVALCANTI, L. C. S et al. Oito lições sobre geossistemas. **Revista da ANPEGE**, v. 20, n. 42, p. 1-31, 2024.

CAVALCANTI, L. C. S, BRAZ, A. M, Oliveira, S. O. CARTOGRAFIA DE PAISAGENS: Fundamentos, Tendências e Reflexões. In: STEINKE, Valdir Adilson; SILVA, Charlei Apartecido da; FIALHO, Edson Soares. Geografia da paisagem: múltiplas abordagens. 2022.

CAVALCANTI, L.C.S.. **Cartografia de paisagens: fundamentos**. Oficina de Textos, 2016.

CAVALCANTI, L.C.S.; RAFAEL, L. M.; SOUZA, B. I. Caatinga: Savana-Estépica ou Floresta Seca? Um comentário sobre a Classificação da Vegetação Brasileira. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 41, p. 173-185, 2024.

CAVALCANTI, Lucas Costa de Souza. **Cartografia de paisagens: fundamentos**. Oficina de Textos, 2014.

CHAPLOT, Vincent; WALTER, C. Subsurface topography to enhance the prediction of the spatial distribution of soil wetness. **Hydrological processes**, v. 17, n. 13, p. 2567-2580, 2003.

CHATURVEDI, R. K. et al. Impacts of human disturbance in tropical dry forests increase with soil moisture stress. **Journal of Vegetation Science**, v. 28, n. 5, p. 997-1007, 2017.

CHAVES, I. de B. et al. Uma classificação morfo-estrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 2, p. 204-213, 2008.

CHAVES, I. DE B.; LOPES, V. L.; FFOLLIOTT, P. F.; PAES-SILVA, A. P. Uma classificação morfoestrutural para descrição e avaliação da biomassa da vegetação da caatinga. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.21, n.2, p.204-213, 2008.

CHEN, Aifang et al. Notable shifting in the responses of vegetation activity to climate change in China. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 87, p. 60-66, 2015.

CHEN, Jin et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. **Remote sensing of Environment**, v. 91, n. 3-4, p. 332-344, 2004.

CLELAND, Elsa E. et al. Shifting plant phenology in response to global change. **Trends in ecology & evolution**, v. 22, n. 7, p. 357-365, 2007.

CLEMENTS, Frederic E. Nature and structure of the climax. *Journal of Ecology*, 24: 252-284, 1936.

CONGALTON, Russell G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote sensing of environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.

CONTI, Georgina et al. Large changes in carbon storage under different land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 197, p. 68-76, 2014.

CORRADINI, Corrado. Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 1-5, 2014.

COSTA, Gabriel Brito et al. Seasonal ecosystem productivity in a seasonally dry tropical forest (caatinga) using flux tower measurements and remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 14, n. 16, p. 3955, 2022.

COSTA, Tânia L. et al. Root and shoot biomasses in the tropical dry forest of semi-arid Northeast Brazil. **Plant and soil**, v. 378, p. 113-123, 2014.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do estado de Alagoas: escala 1:250.000**. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2017

CUI, G., LIU, Y. & TONG, s. Analysis of the causes of wetland landscape patterns and hydrological connectivity changes in Momoge National Nature Reserve based on the Google Earth Engine Platform. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 14, n. 3, p. 1-16, 2021.

CUNHA, John et al. Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: Evidence from the Brazilian Caatinga. **Remote Sensing of Environment**, v. 238, p. 111250, 2020.

DA SILVA, Bruno Fonseca et al. Evaluating the temporal patterns of land use and precipitation under desertification in the semi-arid region of Brazil. **Ecological Informatics**, v. 77, p. 102192, 2023.

DA SILVA, Jhon Lennon Bezerra et al. Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100372, 2020.

DA SILVA, Marcos Vinicius et al. Remote sensing techniques via Google Earth Engine for land degradation assessment in the Brazilian semiarid region, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 120, p. 104061, 2022.

DA SILVA, Paulo Ferreira et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.

DAJOZ, R. **Ecologia geral**. Vozes. Rio de Janeiro, 2 ed. 1973.

DALE, Virginia H. et al. Climate change and forest disturbances: climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. **BioScience**, v. 51, n. 9, p. 723-734, 2001.

DANSEREAU, P. **Biogeography: an ecological perspective**. New York: The Ronald Press Company. 1957. 394p.

DARDEL, Cécile et al. Rain-use-efficiency: What it tells us about the conflicting Sahel greening and Sahelian paradox. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3446-3474, 2014.

DAUBENMIRE, Rexford et al. Plant communities. A textbook of plant synecology. **Plant communities. A textbook of plant synecology.**, 1968. Disponível em: < <https://archive.org/details/plantcommunities0000daub/mode/2up> >. Acesso em: 25 de abril de 2024.

DCARVALHO, Ellen Cristina Dantas; DE SOUZA, Bruno Cruz; TROVÃO, Dilma Maria de Brito Melo. Ecological succession in two remnants of the Caatinga in the semi-arid tropics of Brazil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 10, n. 1, 2012.

DE BEURS, Kirsten M.; HENEGBRY, Geoffrey M. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. **Remote sensing of environment**, v. 89, n. 4, p. 497-509, 2004.

DE BEURS, Kirsten M.; HENEBRY, Geoffrey M. Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology. **Phenological research: methods for environmental and climate change analysis**, p. 177-208, 2010.

DEMIR, Gökben et al. Root water uptake patterns are controlled by tree species interactions and soil water variability. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 2023, p. 1-41, 2023.

DESCALS, Adrià et al. Improved estimates of arctic land surface phenology using Sentinel-2 time series. **Remote Sensing**, v. 12, n. 22, p. 3738, 2020.

DINIZ, Marco Tulio Mendonça. Proposta de classificação das paisagens integradas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 1, n. 1, p. 50-65, 2015.

DOS SANTOS, Cloves Vilas Boas et al. Avaliação do índice de área foliar e índice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**. v. 12. n. 3, 2022.

DOS SANTOS, Cloves Vilas Boas et al. Comparação de imagens multiespectrais utilizando Satélites e VANT para a análise de mudanças estruturais em área de Floresta Seca. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 14 n. 5, 2021.

DRONOVA, Iryna; TADDEO, Sophie. Remote sensing of phenology: Towards the comprehensive indicators of plant community dynamics from species to regional scales. **Journal of Ecology**, v. 110, n. 7, p. 1460-1484, 2022.

DUBAYAH, Ralph et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. **Science of remote sensing**, v. 1, p. 100002, 2020.

DUNCANSON, Laura et al. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. **Remote Sensing of Environment**, v. 270, p. 112845, 2022.

EITEN, G. **Classificação da vegetação do Brasil**. Brasília, DF: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, 1983.

ELLISON, David et al. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. **Global environmental change**, v. 43, p. 51-61, 2017.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento agroecológico de Alagoas: levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Alagoas**. 1. ed. Recife: EMBRAPA, 2012. 238 p.

ERASMI, Stefan et al. Vegetation greenness in northeastern Brazil and its relation to ENSO warm events. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3041-3058, 2014.

ESQUIVEL-MUELBERT, Adriane et al. Seasonal drought limits tree species across the Neotropics. **Ecography**, v. 40, n. 5, p. 618-629, 2017.

EVANS, Jason; GEERKEN, Roland. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. **Journal of arid environments**, v. 57, n. 4, p. 535-554, 2004.

FADL, Mohamed E. et al. Assessing soil productivity potential in arid region using remote sensing vegetation indices. *Journal of Arid Environments*, v. 222, p. 105166, 2024.

FANG, Husheng et al. Shifted global vegetation phenology in response to climate changes and its feedback on vegetation carbon uptake. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 2288, 2023.

FAO. **Global Forest Resources Assessment update 2005 (FRA 2005): Terms and definitions**. FRA Working Paper, Rome, 2005.

FATHI-TAPERASHT, Amin; SHAFIZADEH-MOGHADAM, Hossein; KOUCHAKZADEH, Mahdi. MODIS-based evaluation of agricultural drought, water use efficiency and post-drought in Iran; considering the influence of heterogeneous climatic regions. **Journal of Cleaner Production**, v. 374, p. 133836, 2022.

FEITOSA, João Roberto Pinto. **Uso de técnica de sensoriamento remoto e imagens Landsat-TM e NOAA-AVHRR na estimativa de balanço de energia à superfície**. 2005. 183f. (Tese de Doutorado em Recursos Naturais), Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba – Brasil, 2005.

FELDMAN, Andrew F. et al. Tropical surface temperature response to vegetation cover changes and the role of drylands. **Global Change Biology**, v. 29, n. 1, p. 110-125, 2023.

FENSHOLT, Rasmus et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007—an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. **Remote sensing of environment**, v. 121, p. 144-158, 2012.

FERNANDES, L A et al. Application of the Topographic Wetness Index (TWI) and Phenological Metrics, in the temporal analysis of the vegetation cover behavior in the Northeastern Bahia Mesoregion. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.11, n.4(2021) 213-221, 2021

FERNANDES, Milton Marques et al. Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon stocks in the Sergipe semiarid region, Brazil: 1992–2030. **Land use policy**, v. 99, p. 104795, 2020.

FERNANDES, Moabe Ferreira; QUEIROZ, Luciano Paganucci de. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e cultura**, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.

FERREIRA, Thomás R. et al. The use of remote sensing for reliable estimation of net radiation and its components: a case study for contrasting land covers in an agricultural hotspot of the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 291, p. 108052, 2020.

FISHER, Jeremy Isaac; MUSTARD, John F.; VADEBONCOEUR, Matthew A. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. **Remote sensing of environment**, v. 100, n. 2, p. 265-279, 2006.

FOLEY, Jonathan A. et al. Global consequences of land use. **science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FONSECA, Marina Antongiovanni da. **Fragmentação, conservação e restauração da caatinga**. 2017. 103f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

FOODY, Giles M. Harshness in image classification accuracy assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 11, p. 3137-3158, 2008

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. Ney work: Jhon wilwy e Sons, 1986. 632 p.

FORMIGONI, Mileide de Holanda. **Análise multi-temporal da vegetação na região nordeste do Brasil através do EVI do sensor MODIS**. 2008. xiv, 60 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrária, 2008.

FRANCISCO, Paulo Roberto Megna et al. Detecção de mudança da vegetação de caatinga. Revista **Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 6, p. 1473-1487, 2012.

FREIRE, Neison Cabral Ferreira. **Desertificação na Região de Xingó: Mapeamento e Análise Espectro-Temporal**. 2004. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

FUNK, Chris C. et al. A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. **US Geological Survey**, 2014.

FUNK, Chris et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.

GADEDJISSO-TOSSOU, Agossou; ADJEGAN, Komlavi II; KABLAN, Armand Ketcha Malan. Rainfall and temperature trend analysis by Mann–Kendall test and significance for Rainfed Cereal Yields in Northern Togo. **Sci**, v. 3, n. 1, p. 17, 2021.

GANDOLFI, S.; LEITÃO FILHO, H. F.; BEZERRA, C. L. E. Levantamento florístico e caráter sucessional das espécies arbustivo arbóreas de uma floresta mesófila semidecídua no município de Guarulhos, SP. Revista Brasileira de Biologia, v. 55, n. 4, p.753-767, 1995.



GANEM, Khalil Ali et al. Mapeamento da vegetação da caatinga a partir de dados ópticos de observação da terra—oportunidades e desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 829-854, 2020.

GAO, Lin et al. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 159, p. 364-377, 2020.

GAO, Xiang et al. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. **Remote sensing of environment**, v. 74, n. 3, p. 609-620, 2000.

GARRITY, Steven R. et al. A comparison of multiple phenology data sources for estimating seasonal transitions in deciduous forest carbon exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 1741-1752, 2011.

GHAZOUL, Jaboury et al. Conceptualizing forest degradation. **Trends in ecology & evolution**, v. 30, n. 10, p. 622-632, 2015.

GIONGO, Pedro R.; VETTORAZZI, Carlos A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 833-838, 2014.

GOCIC, Milan; TRAJKOVIC, Slavisa. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and planetary change**, v. 100, p. 172-182, 2013.

GODOY-VEIGA, Milena et al. The value of climate responses of individual trees to detect areas of climate-change refugia, a tree-ring study in the Brazilian seasonally dry tropical forests. **Forest ecology and management**, v. 488, p. 118971, 2021.

GOIRÁN, S. B.; ARANIBAR, J. N.; GOMEZ, M. L. Heterogeneous spatial distribution of traditional livestock settlements and their effects on vegetation cover in arid groundwater coupled ecosystems in the Monte Desert (Argentina). **Journal of Arid Environments**, v. 87, p. 188-197, 2012.

GOMES, Viviane Pedroso. **Avaliação espacial de espécies vegetais em áreas de Caatinga com dados LiDAR**. 2017. 65 f. Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). CFCH. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

GÓMEZ-POMPA, A. Posible papel de la vegetación secundaria en la evolución de la flora tropical. *Biotropica*, Lawrence, 3: 125-35, 1971.

GORELICK, Noel et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

GOWARD, Samuel N.; XUE, Yongkang; CZAJKOWSKI, Kevin P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model. **Remote sensing of environment**, v. 79, n. 2-3, p. 225-242, 2002.

GREEN, Julia K. et al. Surface temperatures reveal the patterns of vegetation water stress and their environmental drivers across the tropical Americas. **Global change biology**, v. 28, n. 9, p. 2940-2955, 2022.

GRUBER, Stephan; PECKHAM, Scott. Land-surface parameters and objects in hydrology. **Developments in soil science**, v. 33, p. 171-194, 2009.

GUARIGUATA, Manuel R.; OSTERTAG, Rebecca. Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. **Forest ecology and management**, v. 148, n. 1-3, p. 185-206, 2001.

GUARIGUATA, Manuel R.; PINARD, Michelle A. Ecological knowledge of regeneration from seed in neotropical forest trees: implications for natural forest management. **Forest ecology and management**, v. 112, n. 1-2, p. 87-99, 1998.

GUILHERME, Adriano Pereira et al. Relação entre tipo de cobertura do solo e temperatura de superfície. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 515-525, 2022.

GURUNG, Ram B. et al. Predicting Enhanced Vegetation Index (EVI) curves for ecosystem modeling applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 10, p. 2186-2193, 2009.

GUTIÉRREZ, Ana Paula A. et al. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.

HATFIELD, Jerry L.; DOLD, Christian. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 103, 2019.

HEINSCH, Faith Ann et al. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 44, n. 7, p. 1908-1925, 2006.

HENRIQUE, Fernanda Lamin. Padrões espaço-temporais da produtividade vegetal na Caatinga. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

HESSLEROVÁ, Petra et al. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. **Ecological engineering**, v. 54, p. 145-154, 2013.

HMIMINA, Gabriel et al. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. **Remote sensing of environment**, v. 132, p. 145-158, 2013.

HOBBS, N. Thompson et al. Fragmentation of arid and semi-arid ecosystems: implications for people and animals. In: **Fragmentation in semi-arid and arid landscapes: Consequences for human and natural systems**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.

HOLZMAN, Mauro E.; RIVAS, Raul; PICCOLO, M. Cintia. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 28, p. 181-192, 2014.

HU ZHONGMIN, Hu ZhongMin et al. Precipitation-use efficiency along a 4500-km grassland transect. **Glob Ecol Biogeogr.** 19:842–8512010.

HUANG, Fang; XU, Shuangling. Spatio-temporal variations of rain-use efficiency in the west of Songliao Plain, China. **Sustainability**, v. 8, n. 4, p. 308, 2016.

HUANG, Jing et al. Climate change and ecological engineering jointly induced vegetation greening in global karst regions from 2001 to 2020. **Plant and Soil**, p. 1-20, 2022.

HUBBELL, S. P.; FOSTER, R. B. Short-term population dynamics of a neotropical forest: why ecological research matters to tropical conservation and management. *Oikos*. v.63: 48-61. 1992.

HUBBELL, Stephen P. Tree Dispersion, Abundance, and Diversity in a Tropical Dry Forest. **SCIENCE**, v. 203, p. 1299, 1979.

HUETE, Alfredo et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote sensing of environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

HUETE, Alfredo; JUSTICE, Christopher; LIU, Huiqing. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of environment**, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994.

HULLEY, Glynn C. et al. Land surface temperature. In: *Taking the Temperature of the Earth*. Elsevier, 2019. p. 57-127.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de uso da terra**. Manuais em geociências. Rio de Janeiro, IBGE, v. n. 7, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Desbravar, conhecer, mapear: memórias do Projeto Radam/RadamBrasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

IBGE. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Rio de Janeiro: IBGE. 2012. 271p

INME, Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1994-2020**. INMET, Brasília/DF, Brasil, 2022.

ISACHENKO, G. A. Long-term conditions of Taiga landscapes of European Russia. In: DYAKONOV, K. N. et al. *Landscape Analysis for sustainable development: theory and applications of landscape science in Russia*. Moscow: Alexpublishers, 2007. p. 144- 155

IVANOV, Marlete Moreira Mendes et al. Seasonal Dynamics of the Phenology of Native Species from the Seasonally Dry Tropical Forest. **Floresta e Ambiente**, v. 29, p. e20220032, 2022.

JACOMINE, P. K. T. et al. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. Boletim Técnico 35. Recife: EMBRAPA, Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975.

JAKOVAC, Catarina C. et al. Land use as a filter for species composition in Amazonian secondary forests. **Journal of vegetation science**, v. 27, n. 6, p. 1104-1116, 2016.

JAKOVAC, Catarina C. et al. The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests. **Biological Reviews**, v. 96, n. 4, p. 1114-1134, 2021.

JARA-GUERRERO, Andrea et al. Chronic disturbance in a tropical dry forest: Disentangling direct and indirect pathways behind the loss of plant richness. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 723985, 2021.

JARDIM, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz et al. Using remote sensing to quantify the joint effects of climate and land use/land cover changes on the caatinga biome of northeast Brazilian. **Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1911, 2022.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução da segunda edição: Epiphany, J.C.N. et al. Editora Parêntese, 598p. 2011.

JESUS, Edilma Nunes de et al. Estrutura dos fragmentos florestais da Bacia Hidrográfica do Rio Poxim-SE, como subsídio à restauração ecológica. **Revista Árvore**, v. 39, n. 3, p. 467-474, 2015.

JESUS, Janisson B. et al. Estimation of aboveground biomass of arboreal species in the semi-arid region of Brazil using SAR (synthetic aperture radar) images. **Journal of Arid Land**, v. 15, n. 6, p. 695-709, 2023.

JESUS, Janisson Batista et al. Fragmentação florestal em região semiárida no Nordeste do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, 2019.

JESUS, Janisson Batista et al. Temporal and phenological profiles of open and dense Caatinga using remote sensing: response to precipitation and its irregularities. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 1067-1076, 2021.

JIANG, Weiguo et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. **Ecological Indicators**, v. 51, p. 117-126, 2015.

JONG, Rogier et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 692-702, 2011.

JOST, G.; SCHUME, H.; HAGER, H. The influence of tree species on soil moisture dynamics and lateral water flow during intense rainfall. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. 2009. p. H42A-07.

JUSTINIANO, Marcos Joaquín; FREDERICKSEN, Todd S. Phenology of tree species in Bolivian dry forests. **Biotropica**, v. 32, n. 2, p. 276-281, 2000.

KACIC, Patrick; HIRNER, Andreas; DA PONTE, Emmanuel. Fusing Sentinel-1 and-2 to model GEDI-derived vegetation structure characteristics in GEE for the Paraguayan Chaco. **Remote Sensing**, v. 13, n. 24, p. 5105, 2021.

KANE, R. P. Prediction of droughts in north-east Brazil: Role of ENSO and use of periodicities. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 17, n. 6, p. 655-665, 1997.

KATTENBORN, Teja et al. Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 173, p. 24-49, 2021.

KAZMIERCKZAC, M. L. **Índice de Vegetação Derivado do NOAA/AVHRR: análise da sazonalidade da cobertura vegetal em região de clima semi-árido (Caatinga)**. Relatório Técnico. FUNCEME, Fortaleza, 1994.

KAZMIERCZAK, MARCOS LEANDRO. Uso de dados AVHRR/NOAA GAC para análise da sazonalidade da caatinga. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 8, p. 513-518, 1996.

KELLNER, James R.; ARMSTON, John; DUNCANSON, Laura. Algorithm theoretical basis document for GEDI footprint aboveground biomass density. **Earth and Space Science**, v. 10, n. 4, p. e2022EA002516, 2023.

KESHAVA, Nirmal; MUSTARD, John F. Spectral unmixing. **IEEE signal processing magazine**, v. 19, n. 1, p. 44-57, 2002.

KONG, Dongxian et al. Time lag of vegetation growth on the Loess Plateau in response to climate factors: Estimation, distribution, and influence. **Science of the Total Environment**, v. 744, p. 140726, 2020.

KOPECKÝ, Martin; MACEK, Martin; WILD, Jan. Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. **Science of the Total Environment**, v. 757, p. 143785, 2021.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.

KUREEL, Neha et al. Modelling vegetation health and stress using hypersepctral remote sensing data. **Modeling Earth Systems and Environment**, p. 1-16, 2022.

LAIPELT, L. et al. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 81-96. 2021

LAURANCE, William F. et al. Fragmentação de habitat, efeitos de borda variáveis e a hipótese de divergência da paisagem. *PLoS one*, v. 2, n. 10, p. e1017, 2007.

LAURANCE, William F. et al. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of biogeography*, v. 29, n. 5-6, p. 737-748, 2002.

LAURANCE, William F.; GOOSEM, Miriam; LAURANCE, Susan GW. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in ecology & evolution*, v. 24, n. 12, p. 659-669, 2009.

LE HOUÉROU, H. N.; BINGHAM, R. L.; SKERBEK, W. Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands. *Journal of arid Environments*, v. 15, n. 1, p. 1-18, 1988.

LE HOUÉROU, Henri N. Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. *Journal of arid Environments*, v. 7, n. 3, p. 213-247, 1984.

LEAL, Laura C.; ANDERSEN, Alan N.; LEAL, Inara R. Anthropogenic disturbance reduces seed-dispersal services for myrmecochorous plants in the Brazilian Caatinga. *Oecologia*, v. 174, p. 173-181, 2014.

LEHTILÄ, Kari et al. Forest succession and population viability of grassland plants: long repayment of extinction debt in *Primula veris*. *Oecologia*, v. 181, p. 125-135, 2016.

LEITE, Pedro AM et al. The influence of forest regrowth on soil hydraulic properties and erosion in a semiarid region of Brazil. *Ecohydrology*, v. 11, n. 3, p. e1910, 2018.

LEMOS, Jesus Rodrigues. **Florística, estrutura e mapeamento da vegetação de caatinga da Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará.** 2006. 139 f. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto de Biociências, Departamento de Botânica, Universidade de São Paulo – São Paulo, 2006.

LI, Zhao-Liang et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of environment*, v. 131, p. 14-37, 2013.

LIANG, Liang; SCHWARTZ, Mark D. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. *Landscape Ecology*, v. 24, p. 465-472, 2009.

LIANG, Shunlin et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator. *Ecological indicators*, v. 58, p. 64-76, 2015.

LIEBMANN, Brant et al. Onset and end of the rainy season in South America in observations and the ECHAM 4.5 atmospheric general circulation model. **Journal of Climate**, v. 20, n. 10, p. 2037-2050, 2007.

LIETH, Helmut (Ed.). **Phenology and seasonality modeling**. Springer Science & Business Media, 2013.

LIMA, Maria Maiany Paiva. **Uso de imagens Sentinel para estimativa do estoque de carbono e biomassa acima do solo no bioma Caatinga**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

LINS, Frederico Abraão Costa et al. Soil moisture and hydrological processes dynamics under climate and land use changes in a semiarid experimental basin, Brazil. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 24, n. 3, p. 681-697, 2024.

LIU, Hui Qing; HUETE, Alfredo. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 33, n. 2, p. 457-465, 1995.

LIU, J. et al. Impact of temporal rainfall variability on ecosystem productivity. **WIREs Water**, 7 (6): e1481. 2020.

LIU, JunShan et al. Effect of rainfall interannual variability on the biomass and soil water distribution in a semiarid shrub community. **Science China Life Sciences**, v. 53, p. 729-737, 2010.

LIU, Ronggao et al. Global evaluation of gap-filling approaches for seasonal NDVI with considering vegetation growth trajectory, protection of key point, noise resistance and curve stability. **Remote Sensing of Environment**, v. 189, p. 164-179, 2017.

LONDOÑO-LEMOS, Viviana; TORRES-GONZÁLES, Alba Marina; MADRIÑÁN, Santiago. Linking Seed Traits and Germination Responses in Caribbean Seasonally Dry Tropical Forest Species. **Plants**, v. 13, n. 10, p. 1318, 2024.

LOS, Sietse O. et al. An observation-based estimate of the strength of rainfall-vegetation interactions in the Sahel. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 16, 2006.

LOZANO-PARRA, Javier et al. Effects of soil moisture and vegetation cover on biomass growth in water-limited environments. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 12, p. 4405-4414, 2018.

LUZ, Leudiane Rodrigues et al. Biomass and vegetation index by remote sensing in different caatinga forest areas. **Ciência Rural**, v. 52, p. e20201104, 2021.

MA, Minfei et al. Quantitative Assessment of the Spatial Scale Effects of the Vegetation Phenology in the Qinling Mountains. **Remote Sensing**, v. 14, n. 22, p. 5749, 2022.

MA, Xuanlong et al. Remote Sensing of Land Surface Phenology. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, p. 4310, 2022.

MA, Xuanlong et al. Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect. **Remote sensing of Environment**, v. 139, p. 97-115, 2013.

MAESTRE, Fernando T.; SALGUERO-GÓMEZ, Roberto; QUERO, José L. It is getting hotter in here: determining and projecting the impacts of global environmental change on drylands. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 367, n. 1606, p. 3062-3075, 2012.

MAGALHÃES, Henrique Fernandes et al. Caatinga ecosystem: a geo-environmental and human perspective. In: **Ethnobotany of the Mountain Regions of Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 3-22.

MALDONADO, F. D. **Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semiárido brasileiro: Quixaba – PE, Brasil**. 116p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: INPE, 1999.

MALDONADO, F. D. **Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal do semiárido**. 2004. 311 f. Tese (Programa de PósGraduação em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

MALLICK, Javed et al. Analysing the trend of rainfall in Asir region of Saudi Arabia using the family of Mann-Kendall tests, innovative trend analysis, and detrended fluctuation analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 143, p. 823-841, 2021.

MARANGON, G. P. Estrutura e padrão espacial em vegetação da Caatinga. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife - PE. 2011. 74p. 2011.

MARIANO, Denis A. et al. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129-143, 2018.

MARINHO, Felipe Pereira et al. Effects of past and present land use on vegetation cover and regeneration in a tropical dryland forest. **Journal of Arid Environments**, v. 132, p. 26-33, 2016.

MARQUES, Thiago V. et al. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, p. 107957, 2020.



MARTÍNEZ-RAMOS, Miguel et al. Natural forest regeneration and ecological restoration in human-modified tropical landscapes. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 745-757, 2016.

MARTINS, F. R. Fitossociologia de florestas no Brasil: um histórico bibliográfico. Pesquisas - série Botânica. v.40, p.103-164. 1989.

MARTINS, Tatiane Barbosa; MARTINS, Lilian Al-Chueyr Pereira. Clements e o conceito de clímax. **Filosofia e História da Biologia**, v. 15, n. 2, p. 225-255, 2020.

MATTISON, Elizabeth HA; NORRIS, Ken. Bridging the gaps between agricultural policy, land-use and biodiversity. **Trends in ecology & evolution**, v. 20, n. 11, p. 610-616, 2005.

MCGARIGAL, K; MARKS, B. J. **FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure**. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 1995.

MEDEIROS, Rodolpho et al. Remote sensing phenology of the Brazilian caatinga and its environmental drivers. **Remote Sensing**, v. 14, n. 11, p. 2637, 2022.

MEHMOOD, Kaleem et al. Analyzing vegetation health dynamics across seasons and regions through NDVI and climatic variables. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 11775, 2024.

MEIRELES, Marcos. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5-TM na Bacia do Acaraú, CE**. 2007. 88 f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2007.

MELO, F. P. L. The socio-ecology of the Caatinga: Understanding how natural resource use shapes an ecosystem. In: SILVA, José Maria Cardoso; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo (Org.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Springer, 2017.

MELO, F. P. L. The socio-ecology of the Caatinga: Understanding how natural resource use shapes an ecosystem. In: SILVA, José Maria Cardoso; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo (Org.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Springer, 2017.

MELO, Felipe PL. The socio-ecology of the Caatinga: understanding how natural resource use shapes an ecosystem. **Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America**, p. 369-382, 2017.

MELO, Maria Vitória Neves et al. Spatiotemporal characterization of land cover and degradation in the agreste region of Pernambuco, Brazil, using cloud geoprocessing on Google Earth Engine. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, p. 100756, 2022.

MENEZES, Rômulo Simões Cezar et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, p. 114943, 2021.

MESQUITA, Rita de Cássia Guimarães et al. Amazon rain forest succession: stochasticity or land-use legacy?. **BioScience**, v. 65, n. 9, p. 849-861, 2015.

METZGER, Jean Paul. O que é ecologia de paisagens. **Biota Neotropica, São Paulo**, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2001.

MILICH, Lenard; WEISS, Eric. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 2, p. 235-260, 2000.

MIRMAZLOUMI, Seyedmohammad et al. Automatic mapping of burned areas using Landsat 8 time-series images in Google Earth engine: a case study from Iran. **Remote sensing**, v. 14, n. 24, article 6375, 2022

MOESLUND, Jesper E. et al. Topographically controlled soil moisture is the primary driver of local vegetation patterns across a lowland region. **Ecosphere**, v. 4, n. 7, p. 1-26, 2013.

MORAIS, Leonardo Fiusa de. **Técnicas de modelagem e geoprocessamento visando ao desenvolvimento de um sistema de alerta precoce para os rebanhos em regiões da caatinga**. 2021. 109 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

MORAIS, Ygor Cristiano Brito et al. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585-599, 2017.

MORELLATO, L. Patricia C.; ALBERTI, L. F.; HUDSON, Irene L. **Applications of circular statistics in plant phenology: a case studies approach**. Springer Netherlands, 2010.

MORELLATO, Leonor Patrícia Cerdeira et al. Linking plant phenology to conservation biology. **Biological conservation**, v. 195, p. 60-72, 2016.

MORO, Marcelo Freire et al. The role of edaphic environment and climate in structuring phylogenetic pattern in seasonally dry tropical plant communities. **PLoS One**, v. 10, n. 3, p. e0119166, 2015.

MOURA FERNANDES, Márcia Rodrigues et al. Aboveground biomass estimation in dry forest in northeastern Brazil using metrics extracted from sentinel-2 data: Comparing parametric and non-parametric estimation methods. **Advances in Space Research**, v. 72, n. 2, p. 361-377, 2023.

MOURA, D.C. Comunidade de abelhas e plantas como indicadores ambientais em áreas de manejo florestal na Caatinga, Nordeste do Brasil. In: GARIGLIO, M. A. et al. (Orgs.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

MURCIA, Carolina. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. **Trends in ecology & evolution**, v. 10, n. 2, p. 58-62, 1995.

MUTTI, Pedro R. et al. Basin scale rainfall-evapotranspiration dynamics in a tropical semiarid environment during dry and wet years. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 75, p. 29-43, 2019.

NASCIMENTO, Diego Marcelino et al. Development of a methodological approach to estimate vegetation biomass using remote sensing in the Brazilian semiarid NE region. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 27, p. 100771, 2022.

NASCIMENTO, Francisco das Chagas Araújo do. **Padrões espaciais e sazonais dos balanços de energia e carbono na caatinga no Estado do Rio Grande do Norte**. 2018. 122 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande - PB, 2018.

NDAYISABA, Felix et al. Inter-annual vegetation changes in response to climate variability in Rwanda. **Journal of Environmental Protection**, v. 8, n. 4, p. 464-481, 2017.

NEEL, Maile C.; MCGARIGAL, Kevin; CUSHMAN, Samuel A. Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area. **Landscape ecology**, v. 19, p. 435-455, 2004.

NEMANI, Ramakrishna R. et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. **science**, v. 300, n. 5625, p. 1560-1563, 2003.

NEVES, D. G. das. **Variabilidade interanual do índice de vegetação no leste do Nordeste do Brasil no período de 1982-1999**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2005

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. Climate Prediction Center, El Niño Southern Oscillation (ENSO). Disponível em: <[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)>. Acesso em: 16 de out. de 2024

NÓBREGA, M. A. da. **Aspectos fitogeográficos da caatinga e potencialidades de seus recursos naturais renováveis**. 1991. 173 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1991.

NOGUEIRA, Rafaella da Silva. **Detecção de incêndios, fragmentação da paisagem e alterações das propriedades do solo na Caatinga**. 2017. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

NORDEN, Natalia et al. Successional dynamics in Neotropical forests are as uncertain as they are predictable. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 26, p. 8013-8018, 2015.

NOUTCHEU, Ronald et al. Chronic human disturbance and environmental forces drive the regeneration mechanisms of a Caatinga dry tropical forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 22, n. 1, p. 79-92, 2024.

NOUTCHEU, Ronald et al. Chronic human disturbance and environmental forces drive the regeneration mechanisms of a Caatinga dry tropical forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 2024.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Ed. Guanabara, Rio de Janeiro. 434p. 1988.

ODUM, E. P. The strategy of ecosystem development. **Science**. v.164, p.262-270. 1969.

OLIVEIRA, Alberlene Ribeiro de. **A desertificação do alto sertão de Sergipe no contexto geográfico**. 232 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2017.

OLIVEIRA, Cinthia Pereira de. **Biomassa e carbono por meio de inventário convencional e LiDAR em floresta seca no Nordeste do Brasil**. 2019. 106 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais) -Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

OLIVEIRA, Janaína Silva de et al. **Florestas tropicais sazonalmente secas na perspectiva da ecologia de paisagens: uma análise geoambiental dos fragmentos de Caatinga no cariri paraibano**. 2023. 129 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

OLIVEIRA, Michele L. et al. Evaluation of water and carbon estimation models in the Caatinga biome based on remote sensing. **Forests**, v. 14, n. 4, p. 828, 2023.

OLIVEIRA, Michele L. et al. Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 835, p. 155490, 2022.

OLIVEIRA, Paulo Jerônimo Lucena de. **Métricas de paisagem e serviços ecossistêmicos: uma abordagem geocológica na ESEC-seridó e zona de amortecimento, NE - Brasil**. 2022. 140f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

OLIVEIRA, S. B. P. et al. Uso de sensoriamento remoto para mapeamento de áreas susceptíveis à desertificação na região semiárida do Brasil. **Ciência & Trópico**, Recife, v. 41, p. 67-96, 2017.

ORUSA, Tommaso et al. A Google Earth Engine Algorithm to Map Phenological Metrics in Mountain Areas Worldwide with Landsat Collection and Sentinel-2. **Geomatics**, v. 3, n. 1, p. 221-238, 2023.

PABON-MORENO, Daniel E. et al. Fisiofenologia do ecossistema revelada usando estatísticas circulares. **Biogeosciences Discussions**, v. 2019, p. 1-29, 2019.

PÄIVINEN, Risto et al. (Ed.). **IUFRO international guidelines for forest monitoring: a project of IUFRO Working Party S4. 02-05**. 1994.

PALÁCIO, Helba Araújo Queiroz et al. Emergy evaluation of semi-arid watersheds under different management strategies. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 6, p. 1357-1363, 2013.

PALOSCHI, Rennan A. et al. Environmental drivers of water use for caatinga woody plant species: combining remote sensing phenology and sap flow measurements. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 75, 2020.

PALOSCHI, Rennan Andres. **Seasonality of water availability, plant phenology, and plant transpiration in a Brazilian Caatinga environment investigated by in situ and remote sensing data**. 2020. 99 f. Thesis (Doctorate in Remote Sensing) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020

PARADELLA, W. R.; VITORELLO, I. Geobotanical and soil spectral investigation for rock discrimination in the “Caatinga” environment (Brazil) based on multitemporal remote sensing data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 52-59, 1995.

PAREETH, Sajid et al. Mapping agricultural landuse patterns from time series of Landsat 8 using random forest based hierarchial approach. **Remote Sensing**, v. 11, n. 5, p. 601, 2019.

PEI, Tingting et al. Vegetation in arid areas of the loess plateau showed more sensitivity of water-use efficiency to seasonal drought. **Forests**, v. 13, n. 5, p. 634, 2022.

PELLETIER, Charlotte et al. Assessing the robustness of Random Forests to map land cover with high resolution satellite image time series over large areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 156-168, 2016.

PEREIRA, João S. et al. Water availability and productivity. **Plant growth and climate change**, p. 118-145, 2006.

PEREIRA, Jorge Luis Gavina et al. Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. **Geografia**, p. 59-90, 2001.

PEREIRA, Marcos Paulo dos Santos; FRANCELINO, Márcio Rocha; QUEIROZ, Jarbas Marçal. A cobertura florestal em paisagens do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n. 00, p. e00134115, 2017.

PEREIRA, I.; ANDRADE, COSTA, J.; DIAS J. Regeneração Natural em um Remanescente da Caatinga sob diferentes níveis de perturbação, no Agreste Paraibano. *Acta Botânica Brasílica*, v.15, n. 3. 2001. p. 413- 426

PÉREZ-CÁRDENAS, Nathalia et al. Effects of landscape composition and site land-use intensity on secondary succession in a tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118818, 2021.

PIAO, Shilong et al. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. **Global change biology**, v. 25, n. 6, p. 1922-1940, 2019.

PIAO, Shilong et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. **Global change biology**, v. 21, n. 4, p. 1601-1609, 2015.

PICKETT, S.T.A.; WHITE, P.S. (Ed.) 1985. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press, 472 p.

PINHEIRO, Everton AR; COSTA, Carlos A. Gomes; DE ARAÚJO, J. C. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 1-4, 2013.

PIO, Fernanda Paula Bicalho et al. Avaliação da técnica de modelo linear de mistura espectral como subsídio à classificação do uso e ocupação do solo. **Geociências (UNESP)**, 42(4), 595–611 2023.

POMARA, Lars Y. et al. Using land surface phenology and information theory to assess and map complex landscape dynamics. **Landscape Ecology**, v. 39, n. 12, p. 203, 2024.

PONCE-CAMPOS, Guillermo E. et al. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. **Nature**, v. 494, n. 7437, p. 349-352, 2013.

PONTES, Édel Guilherme Silva. **Estimativa de componentes do fluxo radiativo na superfície mediante satélite**. 1997. 90f. (Dissertação) Mestrado em Meteorologia, Curso de Mestrado em Meteorologia, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba - Campus II - Campina Grande – Paraíba – Brasil, 1997.

PONZONI, F.J., SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. Editora Parêntese, 127p. 2010.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de textos, 2015.

POORTER, L. et al. Diversity enhances carbon storage in tropical forests. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, n. 11, p. 1314-1328, 2015.

POORTER, Lourens et al. Biomass resilience of neotropical secondary forests. **Nature**, v. 530, n. 7589, p. 211-214, 2016.

POTTER, Christopher et al. Terrestrial carbon sinks for the United States predicted from MODIS satellite data and ecosystem modeling. **Earth Interactions**, v. 11, n. 13, p. 1-21, 2007.

PRINCE, Stephen D.; DE COLSTOUN, E. Brown; KRAVITZ, L. L. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. **Global Change Biology**, v. 4, n. 4, p. 359-374, 1998.

Projeto RADAMBRASIL, **A Vegetação da Região Nordeste: Atualização dos Antropismos e Inventário Florestal**. Salvador, Projeto RADAMBRASIL & IBDF, 155p, 1984

PUEYO, Yolanda; ALADOS, Concepción L. Effects of fragmentation, abiotic factors and land use on vegetation recovery in a semi-arid Mediterranean area. **Basic and Applied Ecology**, v. 8, n. 2, p. 158-170, 2007.

QUEIROZ, Joao Stacishin de. **The Acarau Valley in Northeast Brazil: Vegetation, Soils and Land Use**. 1985. Tese (Doutorado em Filosofia), Utah State University, Logan, 1985.

QUEIROZ, Joel Araújo et al. Análise da estrutura Fitossociológica da Serra do Monte, Boqueirão, Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, p. 251-259, 2006.

QUEIROZ, L.P. CARDOSO, D.; FERNANDES, M.F.; MORO, M.F. Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain. In: SILVA, D.C.; LEAL, I.; TABARELLI, M. Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America, Cham: Springer. 2017. p.23-63

RADUŁA, Małgorzata W.; SZYMURA, Tomasz H.; SZYMURA, Magdalena. Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. **Ecological indicators**, v. 85, p. 172-179, 2018.

RAMÍREZ-CUESTA, Juan Miguel et al. Characterization of the main land processes occurring in Europe (2000-2018) through a MODIS NDVI seasonal parameter-based procedure. **Science of the Total Environment**, v. 799, p. 149346, 2021.

RAMOS, Desirée M. et al. Fenologia multiescala de florestas tropicais sazonalmente secas em um gradiente de aridez. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, p. 1275844, 2023a.

RAMOS, Desirée M. et al. Multiscale phenology of seasonally dry tropical forests in an aridity gradient. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, p. 1275844, 2023b.

RAMOS, Maiara Bezerra et al. The role of chronic anthropogenic disturbances in plant community assembly along a water availability gradient in Brazil's semiarid Caatinga region. **Forest Ecology and Management**, v. 538, p. 120980, 2023c.

RANKINE, C. et al. Comparing MODIS and near-surface vegetation indexes for monitoring tropical dry forest phenology along a successional gradient using optical phenology towers. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, p. 105007, 2017.

RAUN, W. R. et al. Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings. **Journal of plant nutrition**, v. 28, n. 1, p. 173-182, 2005.

RAY, Soumik et al. Time series SARIMA modelling and forecasting of monthly rainfall and temperature in the South Asian countries. **Earth Systems and Environment**, v. 5, p. 531-546, 2021.

REED, Bradley C. et al. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of vegetation science**, v. 5, n. 5, p. 703-714, 1994.

REED, Bradley C.; SCHWARTZ, Mark D.; XIAO, Xiangming. Remote sensing phenology: status and the way forward. **Phenology of ecosystem processes: applications in global change research**, p. 231-246, 2009.

REID, John; CASTKA, Pavel. The impact of remote sensing on monitoring and reporting-The case of conformance systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 393, p. 136331, 2023.

RIBEIRO, Elaine MS et al. Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Applied Ecology**, v. 52, n. 3, p. 611-620, 2015.

RIBEIRO, Elaine MS et al. Phylogenetic impoverishment of plant communities following chronic human disturbances in the Brazilian Caatinga. **Ecology**, v. 97, n. 6, p. 1583-1592, 2016.

RIBEIRO, Milton Cezar et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

RIBEIRO-NETO, José Domingos et al. Chronic anthropogenic disturbance causes homogenization of plant and ant communities in the Brazilian Caatinga. **Biodiversity and conservation**, v. 25, p. 943-956, 2016.

RICHARDSON, Andrew D. et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 169, p. 156-173, 2013.

RICKLEFS, R. E. **Economia da Natureza**. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 542p. 2003.

RITO, Kátia F. et al. Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 3, p. 828-838, 2017.



RIZINNI, A. T. Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos. **Rio de Janeiro: Âmbito Cultural**, 1997.

RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V.; THOMAS, William Wayt. Do the seasonal forests in northeastern Brazil represent a single floristic unit?. **Brazilian journal of biology**, v. 68, p. 467-475, 2008.

RODIN, L.E.; SOCHAVA, V.B. Mapa da vegetação da América do Sul. In: GERASIMOV, I.P. **Atlas Físico-Geográfico do Mundo**. Moscou: Academia de Ciências. 1964. 288p.

RODRIGUES, Joseilson O. et al. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, v. 29, p. 452-465, 2009.

RODRIGUEZ, J. M.; SILVA, E. V.; CAVALCANTI, A. P. B. Geocologia de Paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental. Fortaleza: Editora UFC, 2004.

RODRIGUEZ-ITURBE, Ignacio. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. **Water Resources Research**, v. 36, n. 1, p. 3-9, 2000.

RODRIGUEZ-ITURBE, Ignacio. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation

ROLIN, S. G.; COUTO, H. T. Z.; JESUS, R. M. Tree mortality and recruitment in the Atlantic Forest at Linhares (ES). **Scientia Forestalis**, v.55, p.49-69, 1999.

RUNNING, Steven W.; ZHAO, Maosheng. User's guide daily GPP and annual NPP (MOD17A2H/A3H) and year-end gap-filled (MOD17A2HGF/A3HGF) products NASA earth observing system MODIS land algorithm (for collection 6). **Process. DAAC**, v. 490, p. 1-37, 2019.

SÁ, I. B. **Aplicação da abordagem multi-estágio em sensoriamento remoto para mapeamento da vegetação da caatinga: estudo de caso, Petrolina, PE**. 1991. 96 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1991.

SADEGHI, Morteza et al. The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. **Remote sensing of environment**, v. 198, p. 52-68, 2017.

SADEGHI, Morteza; JONES, Scott B.; PHILPOT, William D. A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 164, p. 66-76, 2015.

SAGAR, R.; RAGHUBANSHI, A. S.; SINGH, J. S. Tree species composition, dispersion and diversity along a disturbance gradient in a dry tropical forest region of India. **Forest ecology and Management**, v. 186, n. 1-3, p. 61-71, 2003.

SALIMON, Cleber; ANDERSON, Liana. How strong is the relationship between rainfall variability and Caatinga productivity? A case study under a changing climate. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2 suppl 1, p. 2121-2127, 2017.

SALINERO-DELGADO, Matías et al. Monitoring Cropland Phenology on Google Earth Engine Using Gaussian Process Regression. **Remote sensing**, v. 14, n. 1, p. 146, 2021.

SALOMÃO, Renato Portela et al. Insights of ecological resilience in Caatinga assemblages—landscape configuration drives Chrysomeloidea (Coleoptera) diversity in a seasonally dry tropical forest. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 44, n. 4, p. 1989-2000, 2024.

SANKARAN, Mahesh et al. Determinants of woody cover in African savannas. **Nature**, v. 438, n. 7069, p. 846-849, 2005.

SANTOS, A. M.; TABARELLI, M. Distance from roads and cities as a predictor of habitat loss and fragmentation in the caatinga vegetation of Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 62, p. 897-905, 2002.

SANTOS, Carlos AC et al. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 101982, 2020.

SANTOS, Cloves Vilas Boas Dos. **Modelagem espectral para determinação de fluxo de CO<sub>2</sub> em áreas de caatinga preservada e em regeneração**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem em Ciência da Terra e do Ambiente) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2017.

SANTOS, Cloves Vilas Boas dos. **Uso de sensoriamento remoto para estimativa de estado hídrico em áreas de floresta seca na região do Vale do São Francisco**. 2023. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

SANTOS, Ríclaudio Silva. **Domínio semiárido da caatinga: uma proposta tipológica e regional através da cartografia de paisagem**. 2024. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro De Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, 2024.

SANTOS, Wilma Roberta et al. Eficiência do Uso da Água para Espécies da Caatinga: uma Revisão Para o Período de 2009-2019. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 05, p. 2573-2591, 2021.

SARMA, Pranjit Kr et al. Land-use and land-cover change and future implication analysis in Manas National Park, India using multi-temporal satellite data. **Current science**, p. 223-227, 2008.

SAVITZKY, Abraham; GOLAY, Marcel JE. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

SCHUCKNECHT, Anne et al. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 40-59, 2013.

SCHULZ, Katharina et al. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 367, p. 62-70, 2016.

SCHULZ, Katharina et al. Grazing, forest density, and carbon storage: towards a more sustainable land use in Caatinga dry forests of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 7, p. 1969-1981, 2018.

SCHULZ, Katharina et al. Grazing reduces plant species diversity of Caatinga dry forests in northeastern Brazil. **Applied Vegetation Science**, v. 22, n. 2, p. 348-359, 2019.

SCHWIEDER, Marcel et al. Landsat phenological metrics and their relation to aboveground carbon in the Brazilian Savanna. **Carbon balance and management**, v. 13, p. 1-15, 2018.

SCHWINGSHACKL, Clemens; HIRSCHI, Martin; SENEVIRATNE, Sonia I. Quantifying spatiotemporal variations of soil moisture control on surface energy balance and near-surface air temperature. **Journal of Climate**, v. 30, n. 18, p. 7105-7124, 2017.

SEABRA, Vinicius da Silva; VICENS, Raul Sánchez; CRUZ, Carla Bernadete Madureira. Conceito de Paisagem numa Perspectiva Geossistêmica. **Revista Ambientale**, v. 4, n. 1, p. 30-42, 2013.

SEARCY, Cory et al. Transformational transparency in supply chains: Leveraging technology to drive radical change. **California management review**, v. 65, n. 1, p. 19-43, 2022.

SENEVIRATNE, Sonia I. et al. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, n. 3-4, p. 125-161, 2010.

SFAIR, Julia C. et al. Chronic human disturbance affects plant trait distribution in a seasonally dry tropical forest. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 2, p. 025005, 2018.

SHAO, Yang et al. An evaluation of time-series smoothing algorithms for land-cover classifications using MODIS-NDVI multi-temporal data. **Remote Sensing of Environment**, v. 174, p. 258-265, 2016.

SHENDRYK, Yuri. Fusing GEDI with earth observation data for large area aboveground biomass mapping. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 115, p. 103108, 2022.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J.A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SHIMABUKURO, Yosio Edemir; DUTRA, Andeise Cerqueira; ARAI, Egidio. Modelo Linear de Mistura Espectral: Conceitos Teóricos, Algoritmos e Aplicações em Estudos na Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1140-1169, 2020.

SHIMABUKURO, Yosio Edemir; PONZONI, Flávio Jorge. **Mistura Espectral: modelo linear e aplicações**. Oficina de Textos, 2017.

SILVA FILHO, Rivaildo da et al. Classificação da cobertura do solo com base em imagens RGB e multiespectrais obtidas por VANT. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 17. v. 6, 2024.

SILVA FILHO, Rivaildo da et al. Representação matemática do comportamento intra-anual do NDVI no Bioma Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 473-488, 2020.

SILVA JUNIOR, Ubiratan Joaquim et al. Mapeamento da vegetação do bioma caatinga por meio de séries temporais modis ndvi e albedo, na bacia hidrográfica do rio Pajeú - PE, BR. **Caminhos de Geografia, Uberlândia**, v. 23, n. 90, p. 75–89, 2022.

SILVA, Augusto C.; SOUZA, Alexandre F. Aridity drives plant biogeographical sub regions in the Caatinga, the largest tropical dry forest and woodland block in South America. **PLoS One**, v. 13, n. 4, p. e0196130, 2018.

SILVA, Delson JF et al. Analysis of surface radiation fluxes and environmental variables over Caatinga vegetation with different densities. **Journal of Arid Environments**, v. 222, p. 105163, 2024.

SILVA, Diego Vicente Sperle; CRUZ, Carla Bernadete Madureira. Tipologias de Caatinga: Uma Revisão em Apoio a Mapeamentos Através de Sensoriamento Remoto Orbital e GEOBIA. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 35, p. 113-120, 2018.

SILVA, J. L. B. et al. Quantification Caatinga vegetable coverage and water availability by remote sensing in the Brazilian semiarid. **J. Hyperspectral Remote Sens**, v. 9, p. 166-176, 2019.

SILVA, Jhon Lennon Bezerra et al. Environmental degradation of vegetation cover and water bodies in the semiarid region of the Brazilian Northeast via cloud geoprocessing techniques applied to orbital data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 121, p. 104164, 2023.

SILVA, José Alves da et al. Caracterização florística, fitossociológica e regeneração natural do sub-bosque da Reserva Genética Florestal Tamanduá, DF. **Ciência Florestal**, v. 14, p. 121-132, 2004.

SILVA, José Maria Cardoso da et al. The Caatinga: understanding the challenges. In: SILVA, José Maria Cardoso; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo (Org.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Springer, 2017.

SILVA, José Maria Cardoso da; BARBOSA, Luis Cláudio Fernandes. Impact of human activities on the Caatinga. **Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America**, p. 359-368, 2017.

SILVA, José Maria Cardoso; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo (Ed.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Springer, 2018.

SILVA, K. K. da. **Avaliação da produtividade primária bruta da caatinga do semiárido paraibano**. 2019. 64 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019.

SILVA, L. F.; SOUZA, B. I.; BACANI, Vitor Matheus. Desempenho comparativo entre classificadores supervisionados no mapeamento de áreas de Ecótono em região de Caatinga. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 59, p. 1083-1105, 2019.

SILVA, Leonardo Pereira et al. Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil. **Global Ecology and Conservation**, v. 21, p. e00811, 2020.

SILVA, Marcos Vinícius et al. Pilot monitoring of caatinga spatial-temporal dynamics through the action of agriculture and livestock in the brazilian semiarid. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 19, p. 100353, 2020.

SILVA, Marcos Vinicius et al. Remote sensing techniques via Google Earth Engine for land degradation assessment in the Brazilian semiarid region, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 120, p. 104061, 2022.

SILVEIRA, Hilton Luís Ferraz et al. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 179-190, 2018.

SINGH, Surendra P. Chronic disturbance, a principal cause of environmental degradation in developing countries. **Environmental conservation**, v. 25, n. 1, p. 1-2, 1998.

SINHA, Aditi; DAVIDAR, Priya. Seed dispersal ecology of a wind dispersed rain forest tree in the Western Ghats, India. **Biotropica**, p. 519-526, 1992.

SKIDMORE, Andrew K. et al. Author Correction: Priority list of biodiversity metrics to observe from space. **Nature ecology & evolution**, v. 5, n. 12, p. 1639-1639, 2021.

SMART, Simon M. et al. Biotic homogenization and changes in species diversity across human-modified ecosystems. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 273, n. 1601, p. 2659-2665, 2006.

SNYDER, K. A.; TARTOWSKI, S. L. Multi-scale temporal variation in water availability: implications for vegetation dynamics in arid and semi-arid ecosystems. **Journal of Arid Environments**, v. 65, n. 2, p. 219-234, 2006.

SOCHAVA, V. B. Algumas noções e termos da Geografia Física. Relatórios do instituto de Geografia da Sibéria e do Extremo Oriente. v.3, 1963.

SOCHAVA, V. B. *Introdução à teoria dos geossistemas*. Novosibirsk: Editora Nauka, 1978.

SOCHAVA, V. B. *O estudo de geossistemas*. Método em questão, 16. São Paulo: IG-USP, 1977.

SOHEL, Md Shawkat Islam. Systematic review and meta-analysis reveals functional traits and climate are good predictors of tropical tree water use. **Trees, Forests and People**, v. 8, p. 100226, 2022.

SOUSA JÚNIOR, Vicente de Paula et al. Land-use and land-cover dynamics in the Brazilian Caatinga dry tropical forest. **Conservation**, v. 2, n. 4, p. 739-752, 2022.

SOUSA, Beatriz Fernandes Simplicio et al. Avaliação de classificadores baseados em aprendizado de máquina para a classificação do uso e cobertura da terra no bioma caatinga. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 62, 2010.

SOUZA, Bartolomeu Israel de. **Cariri Paraibano: do silêncio do lugar à desertificação**. 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2008.

SOUZA, Danielle Gomes et al. Multiple drivers of aboveground biomass in a human-modified landscape of the Caatinga dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 435, p. 57-65, 2019.

SPARACINO, J.; ARGIBAY, D. S.; ESPINDOLA, G. Long-term (35 years) rainy and dry season characterization in semiarid Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 377-391, 2021.

SPATIAL THOUGHTS. Estimating Above Ground Biomass using Random Forest Regression in GEE. 7 fev. de 2024. Disponível em: <https://spatialthoughts.com/2024/02/07/agb-regression-gee/>. Acesso em: 16 de outubro de 2024.

SPERLE DA SILVA, Diego Vicente et al. Mapeamento de tipologias de vegetação de caatinga a partir de imagens orbitais e GEOBIA: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Taperoá, semiárido brasileiro. **GEOgraphia**, vol:25, n.55, 2023

SPERLE DA SILVA, Diego Vicente. **Mapeamento de Tipologias de Caatinga na Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá, PB, Através de Imagens Orbitais e GEOBIA**. 2018. Dissertação de Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

STAN, Kayla D. et al. Tropical dry forest resilience and water use efficiency: an analysis of productivity under climate change. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 5, p. 054027, 2021.

STAN, Kayla; SANCHEZ-AZOFEIFA, Arturo. Tropical dry forest diversity, climatic response, and resilience in a changing climate. **Forests**, v. 10, n. 5, p. 443, 2019.

STREHER, Annia Susin et al. Land surface phenology in the tropics: the role of climate and topography in a snow-free mountain. **Ecosystems**, v. 20, p. 1436-1453, 2017.

SYRBE, Ralf-Uwe; WALZ, Ulrich. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. **Ecological indicators**, v. 21, p. 80-88, 2012.

TABARELLI, Marcelo et al. The future of the Caatinga. **Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America**, p. 461-474, 2017.

TABARI, Hossein; MAROFI, Safar. Changes of pan evaporation in the west of Iran. **Water Resources Management**, v. 25, p. 97-111, 2011.

TASSI, Andrea; VIZZARI, Marco. Object-oriented lulc classification in google earth engine combining snic, glcm, and machine learning algorithms. **Remote Sensing**, v. 12, n. 22, p. 3776, 2020.

TEIXEIRA, AH de C. et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. **Agricultural and forest meteorology**, v. 149, n. 3-4, p. 462-476, 2009.

TEIXEIRA, Léa Moraes Nunes. **Evapotranspiração em vegetação natural do bioma Caatinga obtida por balanço hídrico no solo e por sensoriamento remoto**. 2018. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

TERSCHANSKI, Jonathan et al. The role of vegetation structural diversity in regulating the microclimate of human-modified tropical ecosystems. **Journal of Environmental Management**, v. 360, p. 121128, 2024.

TESKEY, Robert et al. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. **Plant, cell & environment**, v. 38, n. 9, p. 1699-1712, 2015.

TIESSEN, Holm et al. Organic matter transformations and soil fertility in a treed pasture in semiarid NE Brazil. **Plant and Soil**, v. 252, p. 195-205, 2003.

TOMASELLA, Javier et al. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018.

TONELLO, Kelly Cristina; BRAMORSKI, Julieta. Can Trees Help Put Water Back Into the Soil?. **Frontiers for Young Minds**, v. 9, 2021.

TUANMU, Mao-Ning et al. Mapping understory vegetation using phenological characteristics derived from remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 8, p. 1833-1844, 2010.

TURNER, Monica G. Disturbance and landscape dynamics in a changing world. **Ecology**, v. 91, n. 10, p. 2833-2849, 2010.

TURNER, Monica G. et al. A revised concept of landscape equilibrium: disturbance and stability on scaled landscapes. **Landscape ecology**, v. 8, p. 213-227, 1993.

TURNER, Monica Goigel. Landscape ecology: the effect of pattern on process. **Annual review of ecology and systematics**, p. 171-197, 1989.

UNEP. **An assessment of the status of the world's remaining closed forests**. United Nations Environment Programme, 2001.

UNEP/FAO. Report of the UNEP/FAO Expert Meeting on Harmonizing Land Cover and Land Use Classifications. Geneva, 1994.

UNEP/FAO/UNFF. **Vital forest graphics**. United Nations Environment Programme, 2009.

UNESCO. **International classification and mapping of vegetation**. Unesco, 1973.

VANDERMEER, John et al. Multiple basins of attraction in a tropical forest: Evidence for nonequilibrium community structure. **Ecology**, v. 85, n. 2, p. 575-579, 2004.

VELOSO, H.P.; GÓES-FILHO, L. Fitogeografia Brasileira. Classificação Fisionômico-Ecológica da Vegetação. **Bol. Téc. Projeto RADAMBRASIL. Sér. Vegetação N.º 1**, Salvador. 1982

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada ao sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.123p.

VERDUZCO, Vivian S. et al. Variations of net ecosystem production due to seasonal precipitation differences in a tropical dry forest of northwest Mexico. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 10, p. 2081-2094, 2015.



VETTER, Susanne. Rangelands at equilibrium and non-equilibrium: recent developments in the debate. **Journal of Arid Environments**, v. 62, n. 2, p. 321-341, 2005.

VICO, Giulia et al. Climatic, ecophysiological, and phenological controls on plant ecohydrological strategies in seasonally dry ecosystems. **Ecohydrology**, v. 8, n. 4, p. 660-681, 2015.

VIEIRA, Paulo Márcio Souza. **O uso do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada obtido via satélite na caracterização dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1993.

WALKER, Lawrence R.; DEL MORAL, Roger. Transition dynamics in succession: implications for rates, trajectories and restoration. **New models for ecosystem dynamics and restoration**, p. 33-49, 2009.

WANG, Cangjiao et al. Factors affecting relative height and ground elevation estimations of GEDI among forest types across the conterminous USA. **GIScience & Remote Sensing**, v. 59, n. 1, p. 975-999, 2022.

WANG, Meng; AN, Zhengfeng; WANG, Shouyan. The time lag effect improves prediction of the effects of climate change on vegetation growth in Southwest China. **Remote Sensing**, v. 14, n. 21, p. 5580, 2022.

WEI, Xiaorong et al. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. **Scientific reports**, v. 4, n. 1, p. 4062, 2014.

WEI, Xiaoshuai et al. Exploring Sensitivity of Phenology to Seasonal Climate Differences in Temperate Grasslands of China Based on Normalized Difference Vegetation Index. **Land**, v. 13, n. 3, p. 399, 2024.

WELTZIN, Jake F. et al. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. **Bioscience**, v. 53, n. 10, p. 941-952, 2003.

WESSELS, Konrad J. et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. **Journal of arid environments**, v. 68, n. 2, p. 271-297, 2007.

WHITMORE, T. C. Canopy gaps and the two major groups of forest tree. **Ecology**, v.70, n.3, p.536-538, 1989.

WICK, Barbara; TIESSEN, Holm; MENEZES, Romulo SC. Land quality changes following the conversion of the natural vegetation into silvo-pastoral systems in semi-arid NE Brazil. **Plant and soil**, v. 222, n. 1, p. 59-70, 2000.

WIENS, John A. Central concepts and issues of landscape ecology. In: **Applying landscape ecology in biological conservation**. New York, NY: Springer New York, 2002. p. 3-21.

WIESMEIER, Martin et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, p. 149-162, 2019.

WOLF, Amelia A.; ZAVALETA, Erika S.; SELMANTS, Paul C. Flowering phenology shifts in response to biodiversity loss. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 13, p. 3463-3468, 2017.

WOODROFFE, Rosie; GINSBERG, Joshua R. Edge effects and the extinction of populations inside protected areas. **Science**, v. 280, n. 5372, p. 2126-2128, 1998.

WRIGHT, Cynthia L. et al. Plant functional types broadly describe water use strategies in the Caatinga, a seasonally dry tropical forest in northeast Brazil. **Ecology and Evolution**, v. 11, n. 17, p. 11808-11825, 2021.

XIE, Qiaoyun et al. Land surface phenology indicators retrieved across diverse ecosystems using a modified threshold algorithm. **Ecological Indicators**, v. 147, p. 110000, 2023.

XUE, Jinru; SU, Baofeng. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of sensors**, v. 2017, n. 1, p. 1353691, 2017.

YANG, Lei; CHEN, Liding; WEI, Wei. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions. **Catena**, v. 124, p. 138-146, 2015.

ZENG, Linglin et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 237, p. 111511, 2020.

ZHANG, Tianyou et al. Patterns and controls of vegetation productivity and precipitation-use efficiency across Eurasian grasslands. **Science of The Total Environment**, v. 741, p. 140204, 2020.

ZHANG, Xiaoyang et al. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D12, 2005.

ZHANG, Xiaoyang et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote sensing of environment**, v. 84, n. 3, p. 471-475, 2003.

ZHANG, Xiaoyang; YE, Yongchang; SHUAI, An. Impacts of Land Disturbance on Satellite-Derived Trend of Long-term Land Surface Phenology. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. p. B11L-1931. 2023.

ZHANG, Yangjian et al. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate. **Global Ecology and Biogeography**, v. 18, n. 3, p. 280-290, 2009.

ZHAO, Maosheng; RUNNING, Steven W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. **science**, v. 329, n. 5994, p. 940-943, 2010.

ZHAO, Yanchuang; WANG, Xinyuan; VÁZQUEZ-JIMÉNEZ, René. Evaluating the performance of remote sensed rain-use efficiency as an indicator of ecosystem functioning in semi-arid ecosystems. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 10, p. 3344-3362, 2018.

ZHOU, Jie et al. On the performance of remote sensing time series reconstruction methods—A spatial comparison. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 367-384, 2016.

ZHOU, Xiang; YAMAGUCHI, Yasushi; ARJASAKUSUMA, Sanjiwana. Distinguishing the vegetation dynamics induced by anthropogenic factors using vegetation optical depth and AVHRR NDVI: A cross-border study on the Mongolian Plateau. **Science of the Total Environment**, v. 616, p. 730-743, 2018.

ZOU, Lidong et al. Assessment of the response of tropical dry forests to El Niño southern oscillation. **Ecological Indicators**, v. 133, p. 108390, 2021.

ZOU, Lidong; CAO, Sen; SANCHEZ-AZOFEIFA, Arturo. Evaluating the utility of various drought indices to monitor meteorological drought in Tropical Dry Forests. **International Journal of Biometeorology**, v. 64, n. 4, p. 701-711, 2020.

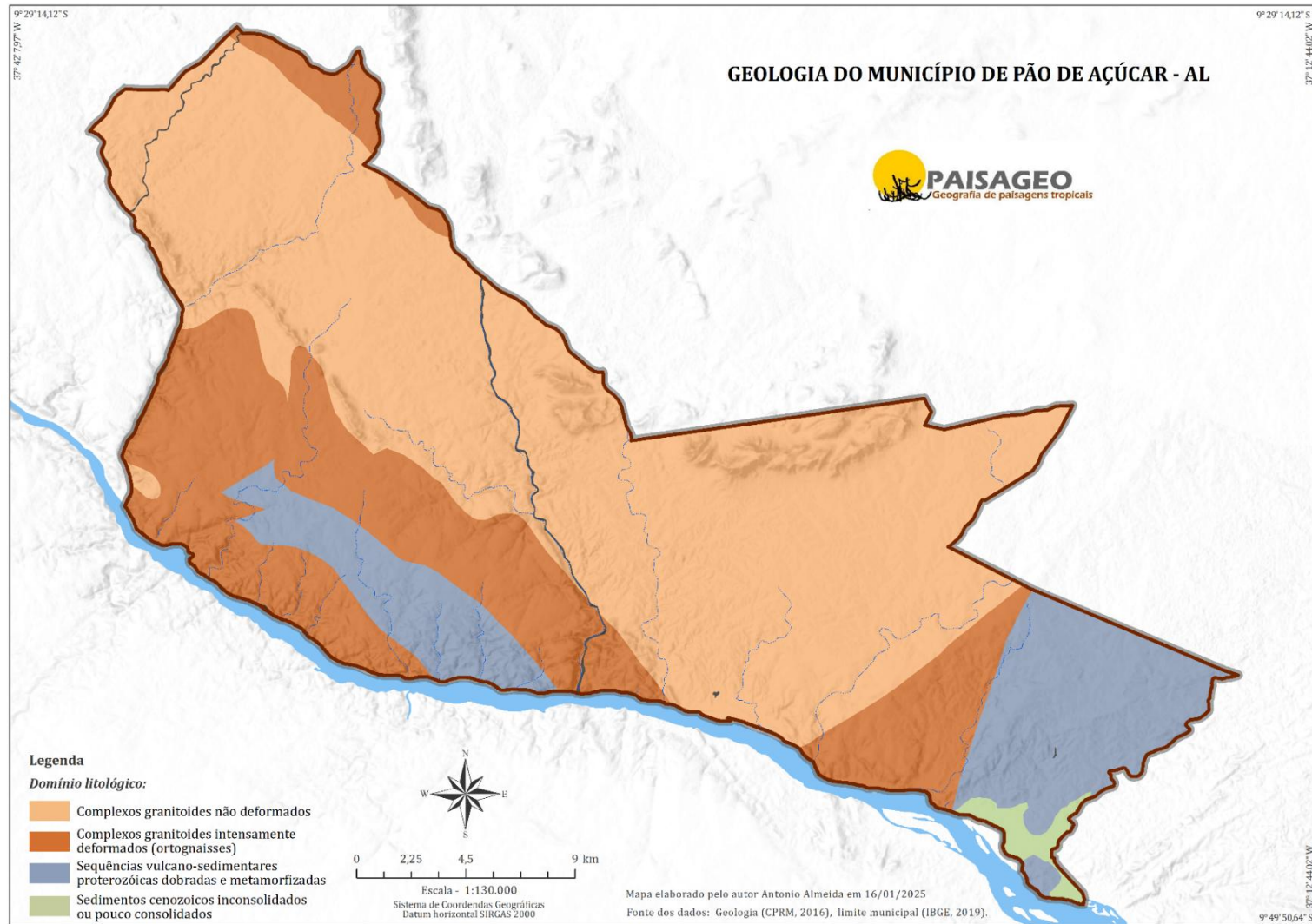
ZURQANI, Hamdi A. A multi-source approach combining GEDI LiDAR, satellite data, and machine learning algorithms for estimating forest aboveground biomass on Google Earth engine platform. **Ecological Informatics**, p. 103052, 2024.

ZURQANI, Hamdi A. et al. Geospatial analysis of land use change in the Savannah River Basin using Google Earth Engine. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 69, p. 175-185, 2018.

## APÊNDICES

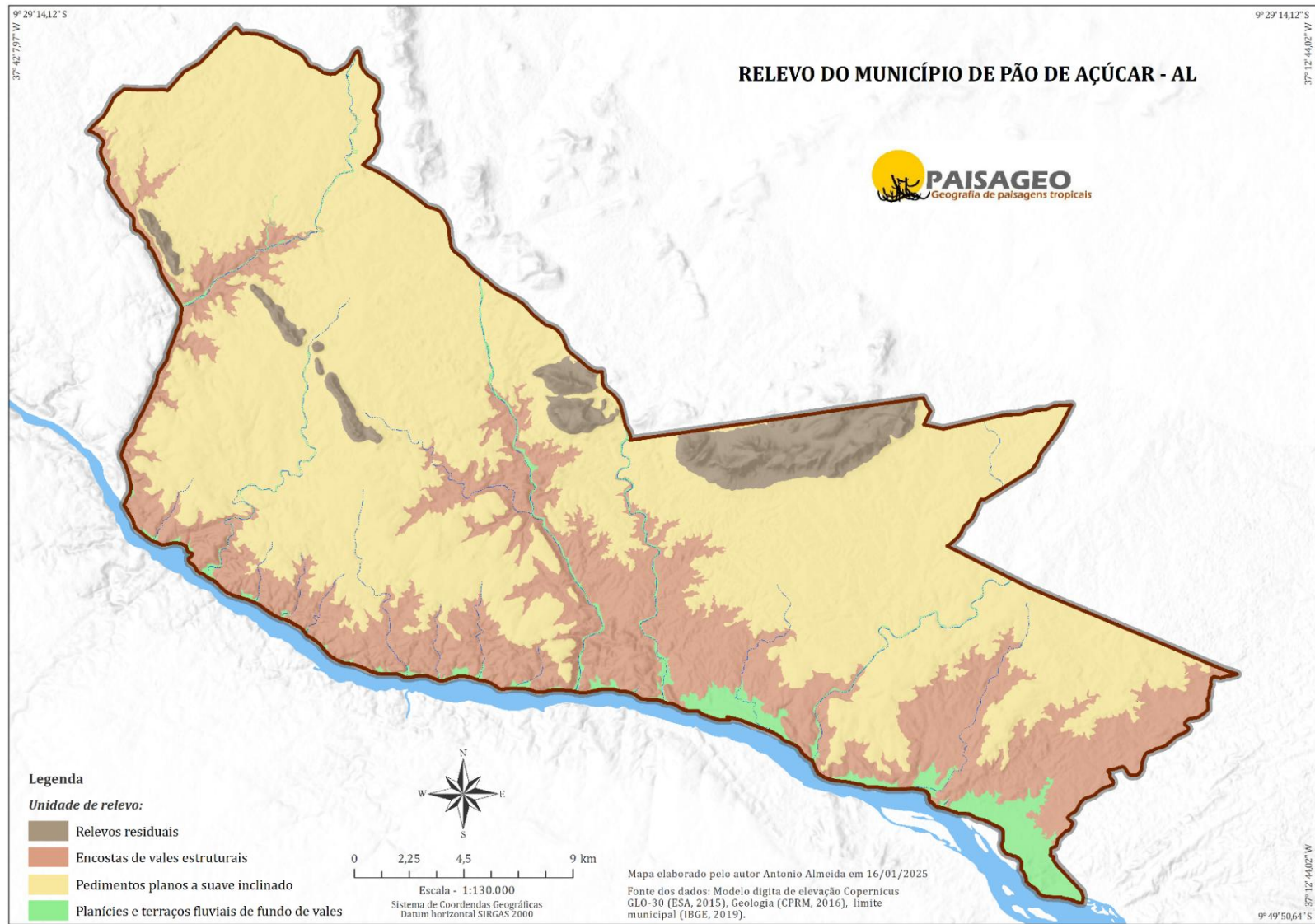
## APÊNDICE A - MAPAS TEMÁTICOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MUNICÍPIO DE PÃO DE AÇÚCAR

Mapa A.1 – Geologia do município de Pão de Açúcar.



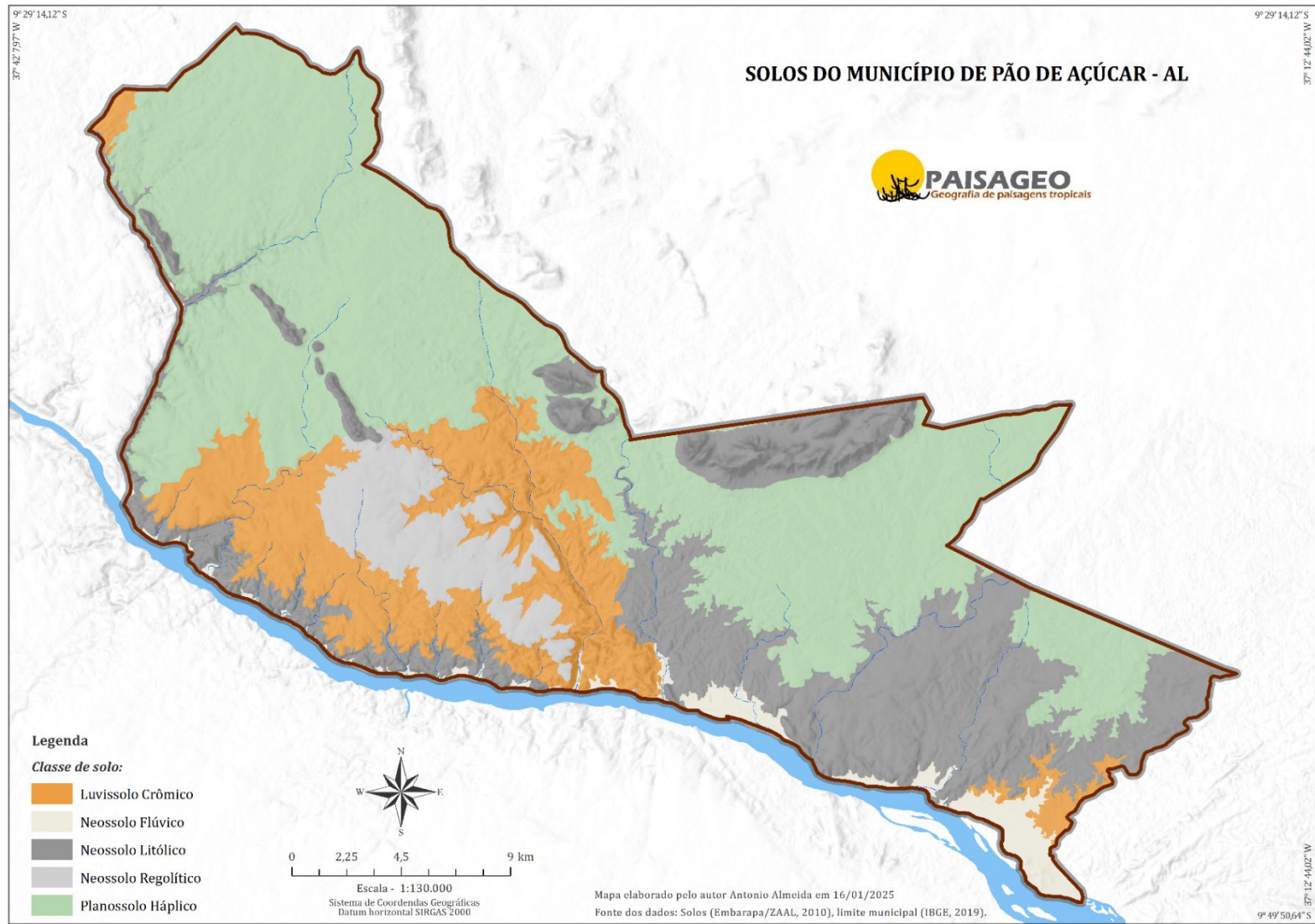
Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa A.2 – Relevo do município de Pão de Açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor

Mapa A.3 – Solos do município de Pão de Açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor

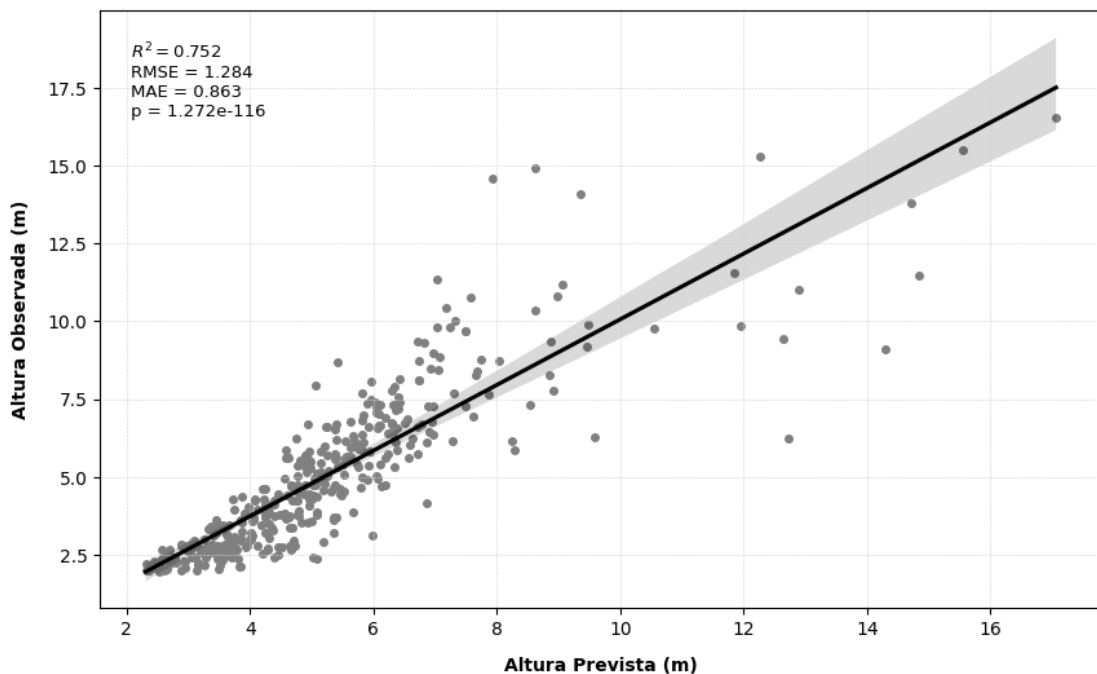
## APÊNDICE B - AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE REGRESSÃO ESTRUTURAL E BIOFÍSICA

### APÊNDICE B.1 – AVALIAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO:

- **Modelagem da Altura da Vegetação**

O modelo de regressão para altura apresentou bom desempenho no conjunto de treinamento, com  $R^2=0,752$ , indicando que aproximadamente 75% da variabilidade dos dados observados foi explicada pelos valores previstos. O valor de RMSE (1,284) demonstra um erro médio aceitável, considerando a amplitude de altura presente nas áreas amostradas. O MAE de 0,863 confirma que, em termos absolutos, os desvios médios entre observado e previsto são baixos. A significância estatística da regressão é reforçada pelo valor de  $p=1,272 \times 10^{-70}$ , praticamente nulo, indicando alta confiabilidade na relação modelada.

Figura B.1 – Relação entre altura (m) observada e prevista no treinamento

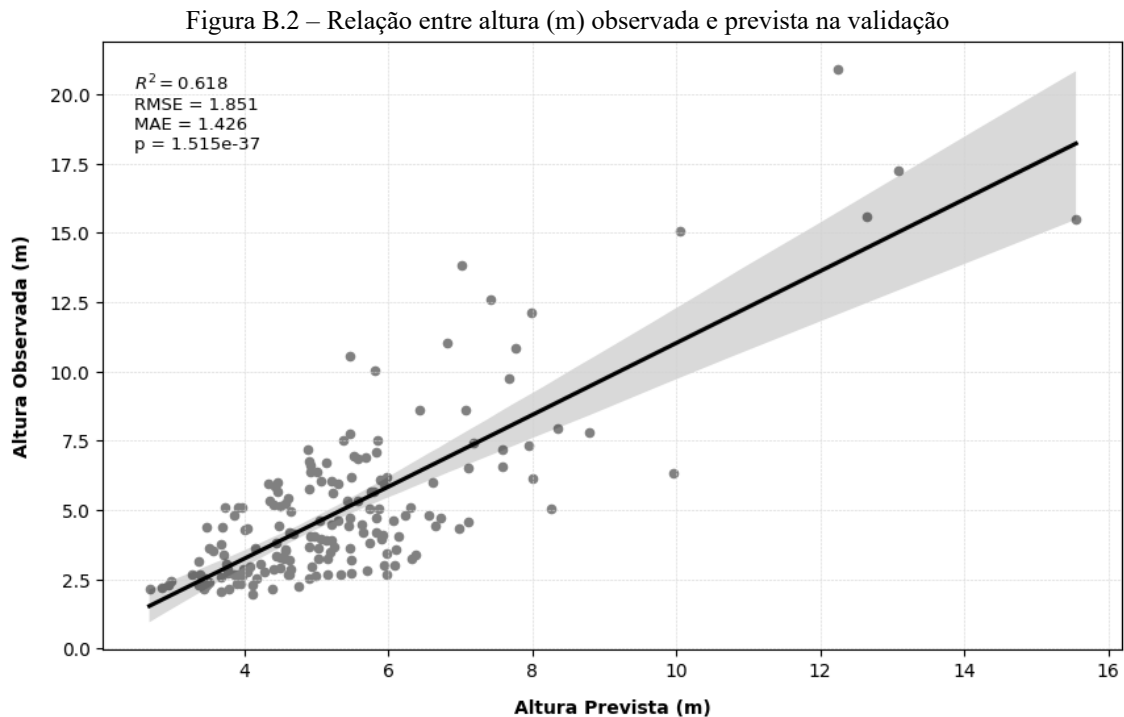


Fonte: Elaborado pelo autor

No conjunto de validação, o modelo manteve consistência, com  $R^2=0,618$ , um resultado satisfatório para um ambiente heterogêneo como a Caatinga. Embora o RMSE tenha se elevado para 1,851, essa variação é esperada devido à aplicação do modelo em dados não vistos. O



MAE de 1,426 permanece dentro de limites aceitáveis, evidenciando a boa capacidade preditiva do modelo. O valor de  $p=1,515 \times 10^{-37}$  reforça a significância estatística da regressão.



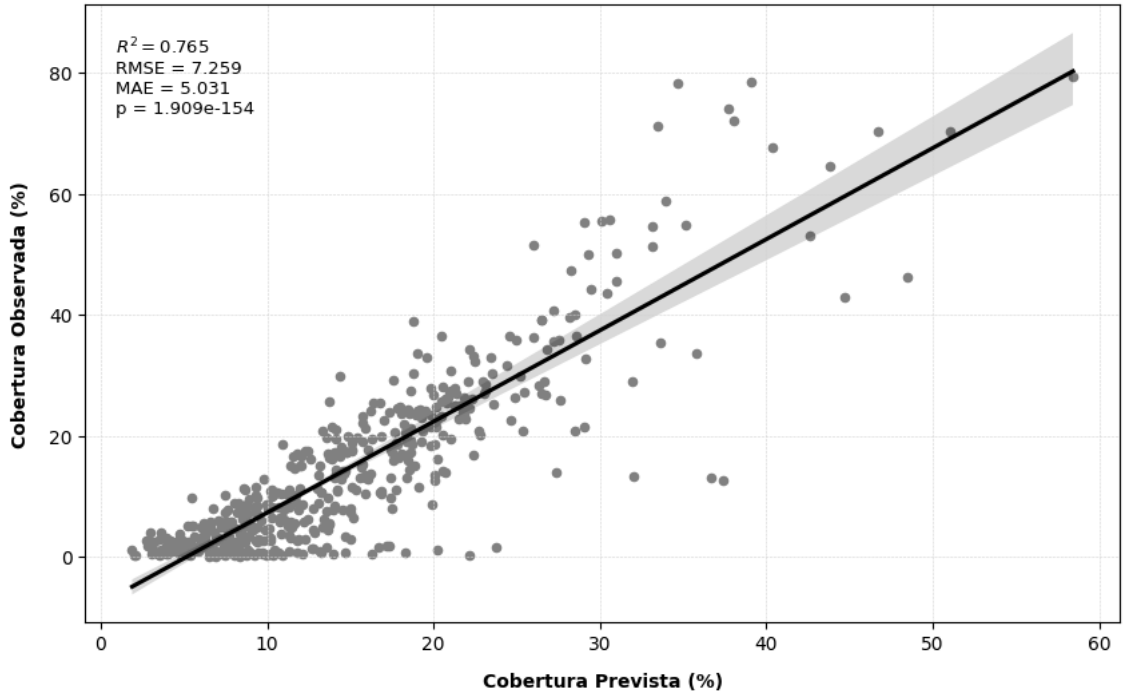
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Modelagem da Cobertura Vegetal**

O modelo para cobertura vegetal demonstrou excelente capacidade explicativa no conjunto de treinamento, com  $R^2=0,765$ , superando inclusive o desempenho observado no modelo de altura. O RMSE de 7,259 representa um erro médio relativamente baixo em termos percentuais, e o MAE de 5,031 confirma essa precisão em valores absolutos. O valor de  $p=1,909 \times 10^{-154}$  demonstra elevada significância da regressão.

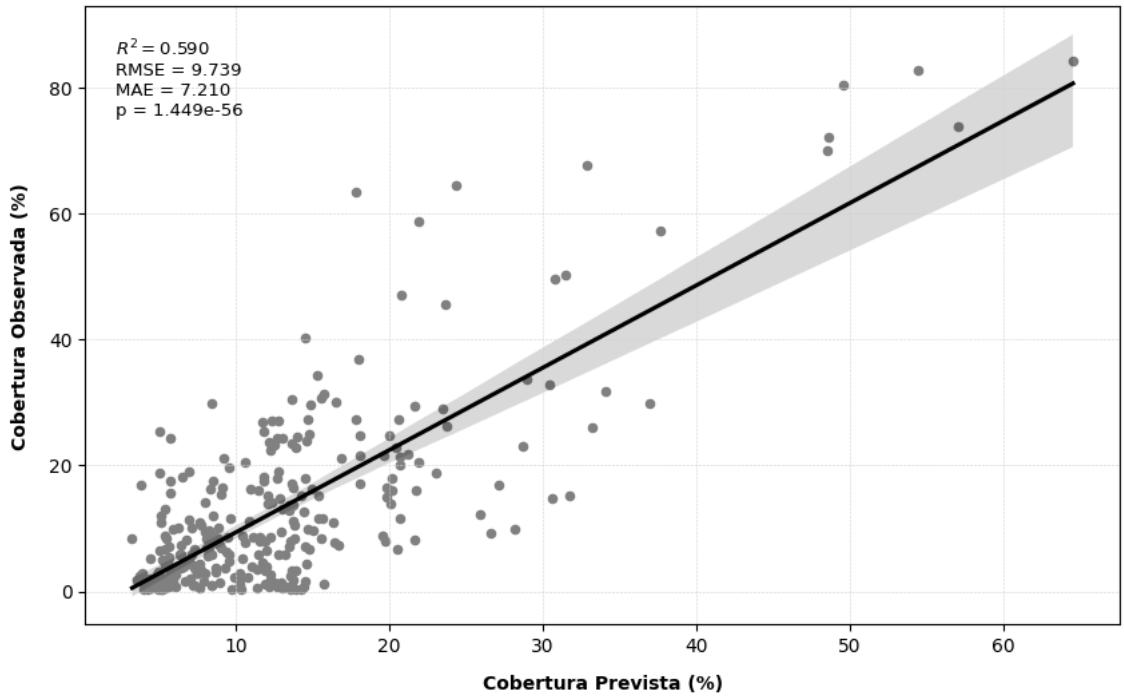
Na validação, o modelo manteve estabilidade com  $R^2=0,590$ , o que pode ser considerado satisfatório em função da alta variabilidade fisionômica da cobertura vegetal na Caatinga. O RMSE de 9,739 e o MAE de 7,210 evidenciam que os erros permanecem dentro de uma faixa aceitável para mapeamentos em escala regional. O valor de  $p=1,449 \times 10^{-56}$  garante a significância estatística da relação linear modelada, validando o desempenho da estimativa mesmo sobre dados independentes.

Figura B.3 – Relação entre cobertura (%) observada e prevista no treinamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura B.4 – Relação entre cobertura (%) observada e prevista na validação

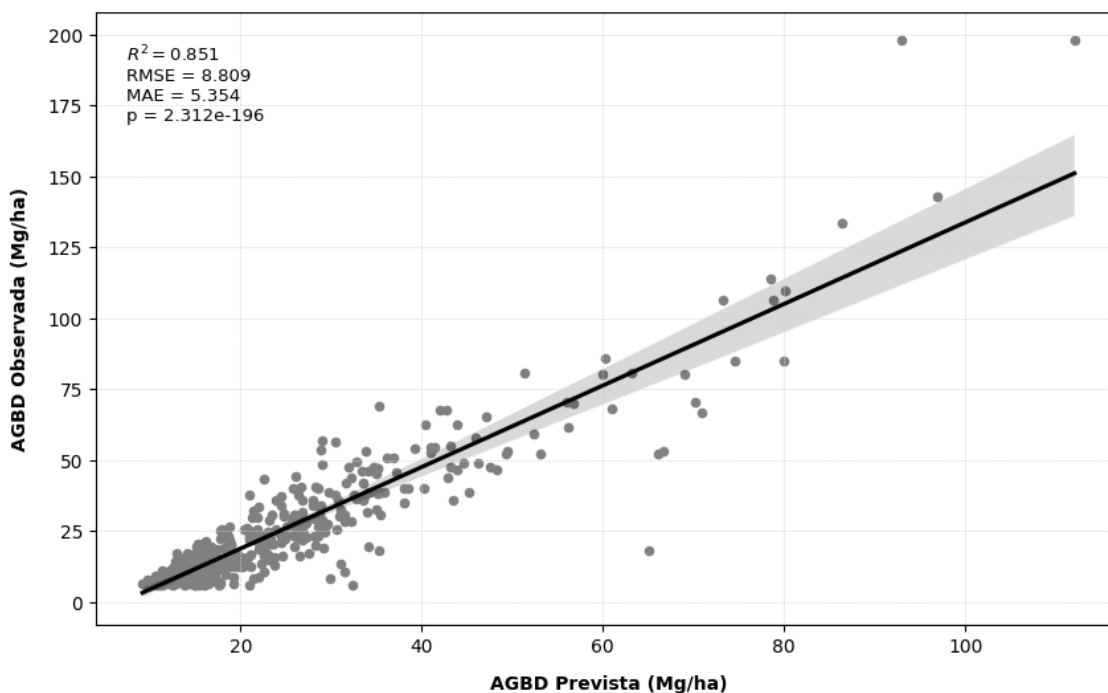


Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE B.2 – AVALIAÇÃO DO MODELO DE REGRESSÃO DA DENSIDADE DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO (AGBD):

O modelo de regressão para estimativa da densidade de biomassa acima do solo (AGBD) apresentou desempenho satisfatório no conjunto de treinamento, com  $R^2 = 0,851$ , indicando que aproximadamente 85% da variabilidade da biomassa observada foi explicada pelos valores previstos. O RMSE de 8,809 representa um desvio moderado, coerente com a amplitude de biomassa presente na área amostrada. O MAE de 5,354 confirma que os desvios médios entre os valores previstos e observados são baixos em termos absolutos. A elevada significância estatística do modelo é reforçada pelo valor de  $p = 2,312 \times 10^{-196}$ , evidenciando a robustez da relação modelada.

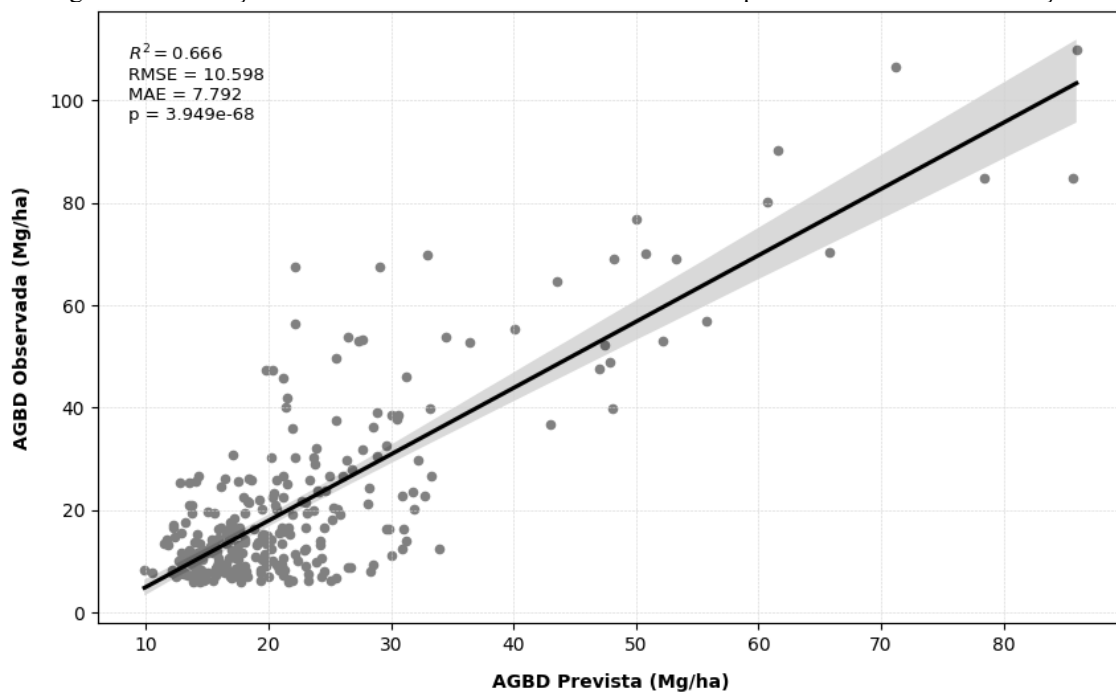
Figura B.5 – Relação entre a densidade de biomassa observada e prevista nos dados de treinamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

No conjunto de validação, o modelo demonstrou consistência preditiva, com um  $R^2 = 0,666$ , o que corresponde a uma explicação de cerca de 67% da variação nos dados observados. Embora o RMSE tenha aumentado para 10,598, esse crescimento é esperado, visto que o modelo foi aplicado a dados não utilizados no treinamento. O MAE de 7,792 ainda se encontra dentro de limites aceitáveis, considerando a heterogeneidade estrutural da vegetação da Caatinga. O valor de  $p = 3,949 \times 10^{-68}$  mantém a significância estatística da regressão, validando a capacidade preditiva do modelo mesmo em novos conjuntos de dados.

Figura B.6 – Relação entre a densidade de biomassa observada e prevista nos dados de validação.



Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE C - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO LENHOSA

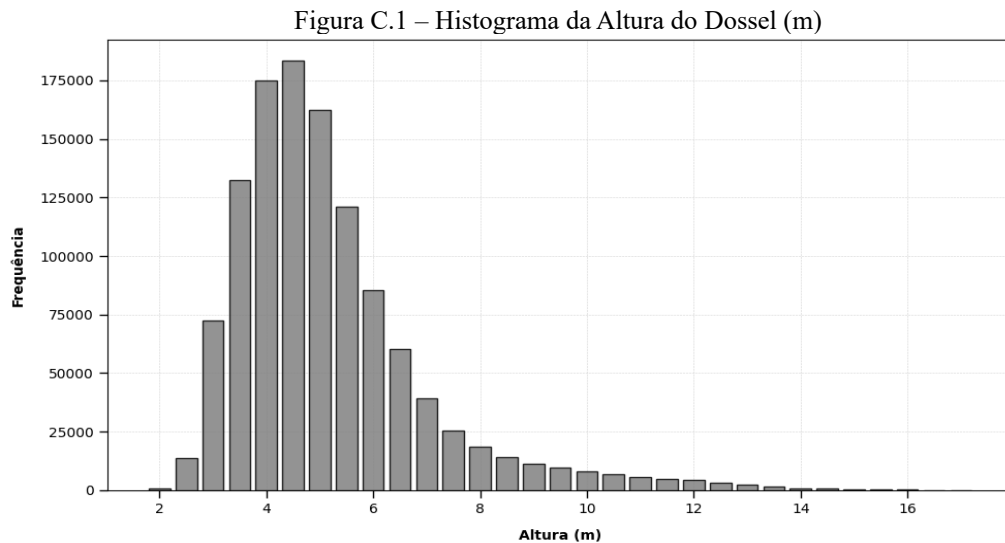
Este apêndice apresenta os resultados da análise estatística descritiva das estimativas geradas para a altura e a cobertura do dossel da vegetação lenhosa da Caatinga, com base na aplicação do modelo de regressão para o ano de 2024. As estatísticas foram derivadas da superfície contínua gerada pelo modelo.

- **Estatísticas Descritivas da Altura do Dossel (m)**

A estimativa da altura do dossel apresentou a seguinte distribuição estatística em 2024:

<b>Estatística</b>	<b>Valor (m)</b>
Mínimo	2,40
Máximo	17,04
Média	5,41
Mediana	5,03
Desvio Padrão	1,81

A Figura C.1 apresenta o histograma da altura do dossel. Observa-se uma distribuição assimétrica à direita, com concentração de valores entre 3 e 6 metros, e ocorrência pontual de valores mais elevados em áreas específicas. A distribuição apresenta uma cauda longa que se estende até valores superiores a 16 metros, refletindo a presença de formações arbóreas mais desenvolvidas.



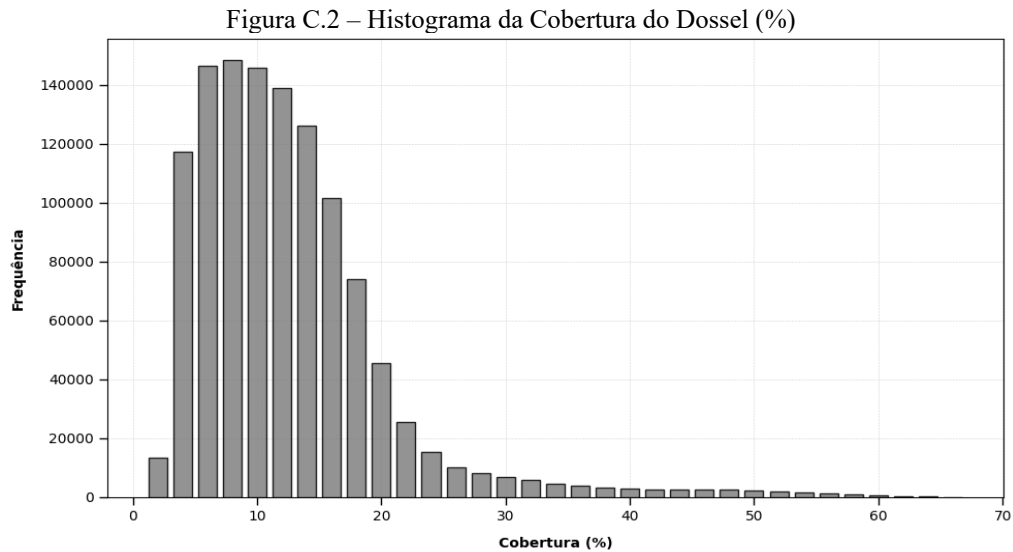
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Estatísticas Descritivas da Cobertura do Dossel (%)**

A estimativa da cobertura vegetal seguiu o seguinte perfil estatístico em 2024:

<b>Estatística</b>	<b>Valor (%)</b>
Mínimo	2,09
Máximo	67,28
Média	13,58
Mediana	12,25
Desvio Padrão	8,00

A Figura C.2 exibe o histograma da cobertura do dossel. A distribuição apresenta assimetria à direita, com predominância de valores entre 5% e 20%, refletindo o padrão de vegetação mais aberta. A cauda longa da distribuição, que se estende até valores superiores a 60%, representa formações pontuais com maior densidade de cobertura.



Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE D - PLATAFORMAS INTERATIVAS PARA ANÁLISE E MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA

### APÊNDICE D.1 – APLICATIVO CAATINGACLASS: CLASSIFICADOR TIPOLOGICO DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA

#### **Descrição Geral da Aplicação**

O aplicativo CaatingaClass foi desenvolvido com o objetivo de realizar a classificação tipológica da vegetação lenhosa da Caatinga, a partir da modelagem estrutural baseada em dados LiDAR do sensor GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation). Os produtos utilizados (L2A e L2B) fornecem estimativas diretas de altura da vegetação (RH95) e cobertura do dossel (TCC), permitindo uma avaliação detalhada da estrutura da vegetação em alta resolução espacial.

Por meio de um modelo de regressão baseado no algoritmo Random Forest, o aplicativo gera mapas contínuos de estrutura vegetal, classificando automaticamente a vegetação em seis tipologias distintas, fundamentadas nos critérios de cobertura e altura vegetacional adotados por organismos internacionais como UNESCO, FAO e UNEP.

A classificação contempla formações arbóreas ou arbustivas, bem como formações mistas arbustivo-arbóreas, detectadas com base na análise espacial de manchas arbóreas dispersas em matrizes arbustivas, utilizando um raio médio de dispersão ecológica. A ferramenta permite, assim, representar com maior realismo a complexidade e a heterogeneidade estrutural da vegetação da Caatinga.

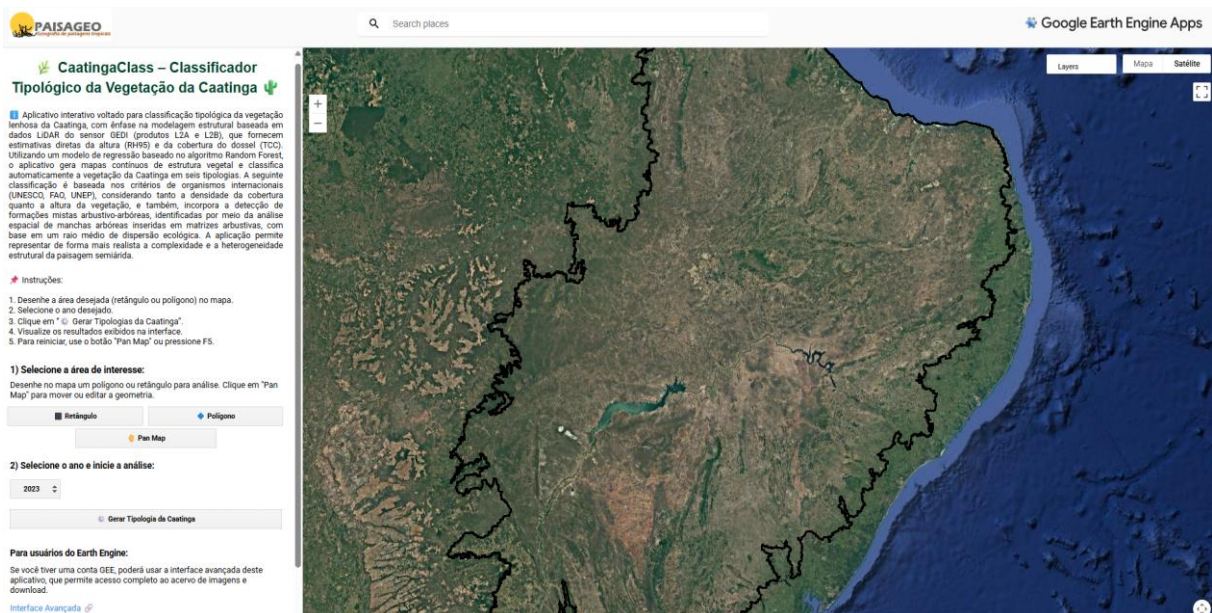
#### **Funcionalidades Principais**

- Aplicação automática de máscara temática do MapBiomas, restringindo a análise exclusivamente às áreas de vegetação lenhosa da Caatinga,
- Classificação automática da vegetação lenhosa em seis tipologias: Caatinga Arbórea Densa (CAD); Caatinga Arbórea Aberta (CAA); Caatinga Arbustiva Densa (CArD); Caatinga Arbustiva Aberta (CArA); Caatinga Arbustiva-Arbórea Aberta (CArAA).
- Geração de mapas temáticos interativos, com cores padronizadas por tipologia, legendas automáticas e visualização geográfica precisa da estrutura da vegetação.

- Painel de estatísticas descritivas dinâmico, que apresenta a área ocupada (em km<sup>2</sup> e %) por cada classe tipológica na área analisada, facilitando a compreensão da composição estrutural.
- Capacidade de análise multitemporal, permitindo detectar mudanças na estrutura e composição tipológica da vegetação lenhosa da Caatinga ao longo do tempo.

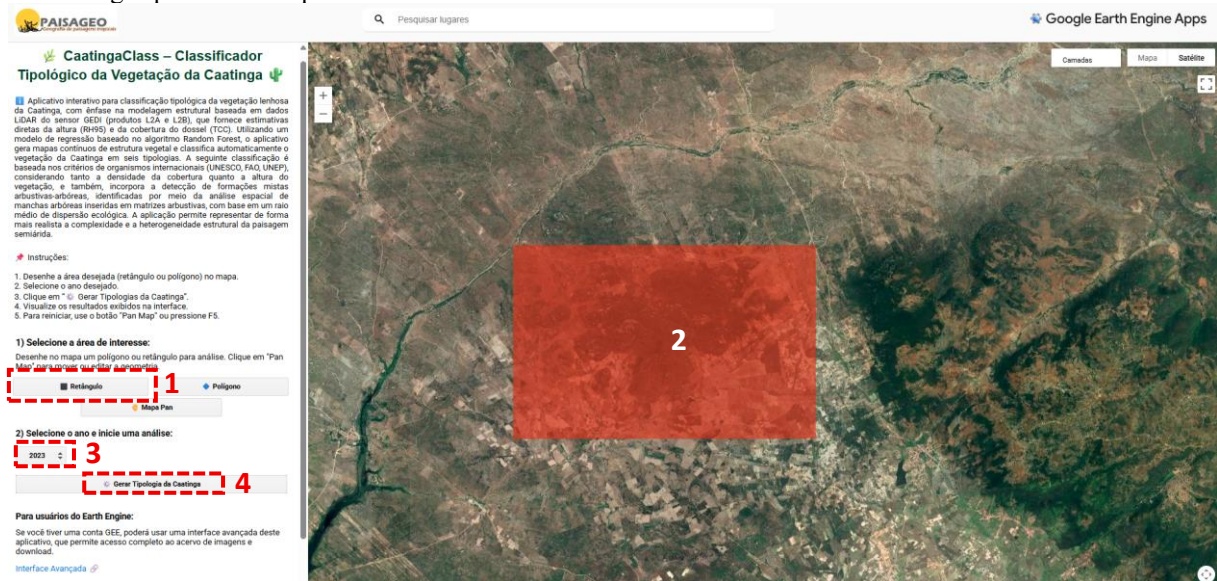
## Instruções de Uso e Interface da Plataforma

**Figura C1.1** – Visão geral da interface do aplicativo *CaatingaClass* desenvolvido no ambiente Google Earth Engine Apps, com painel lateral de controle e ferramentas de interação no mapa.

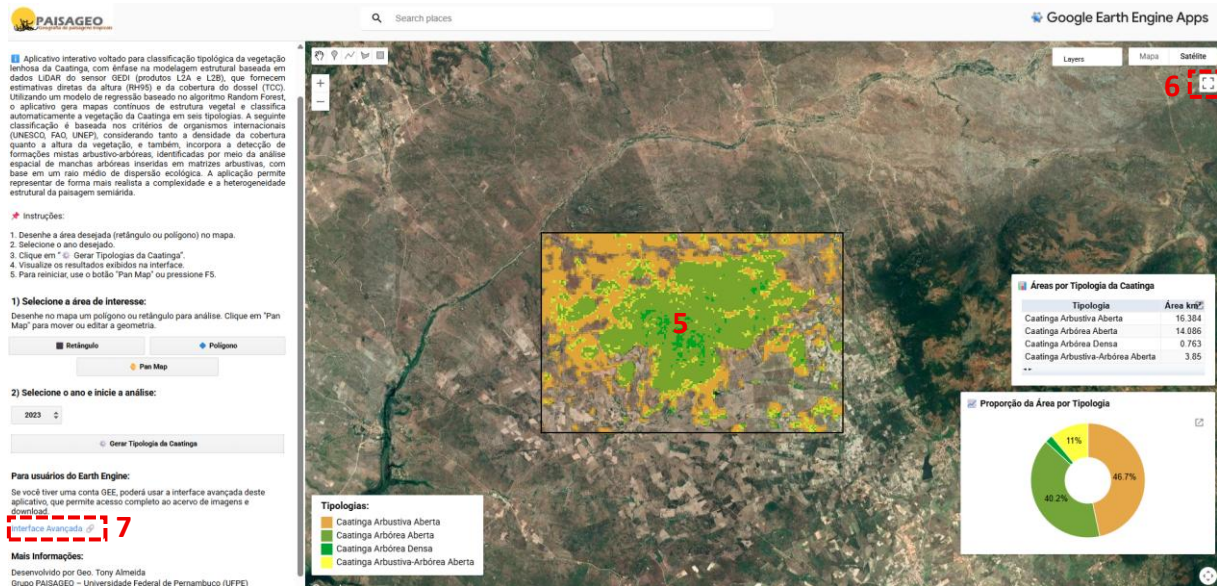




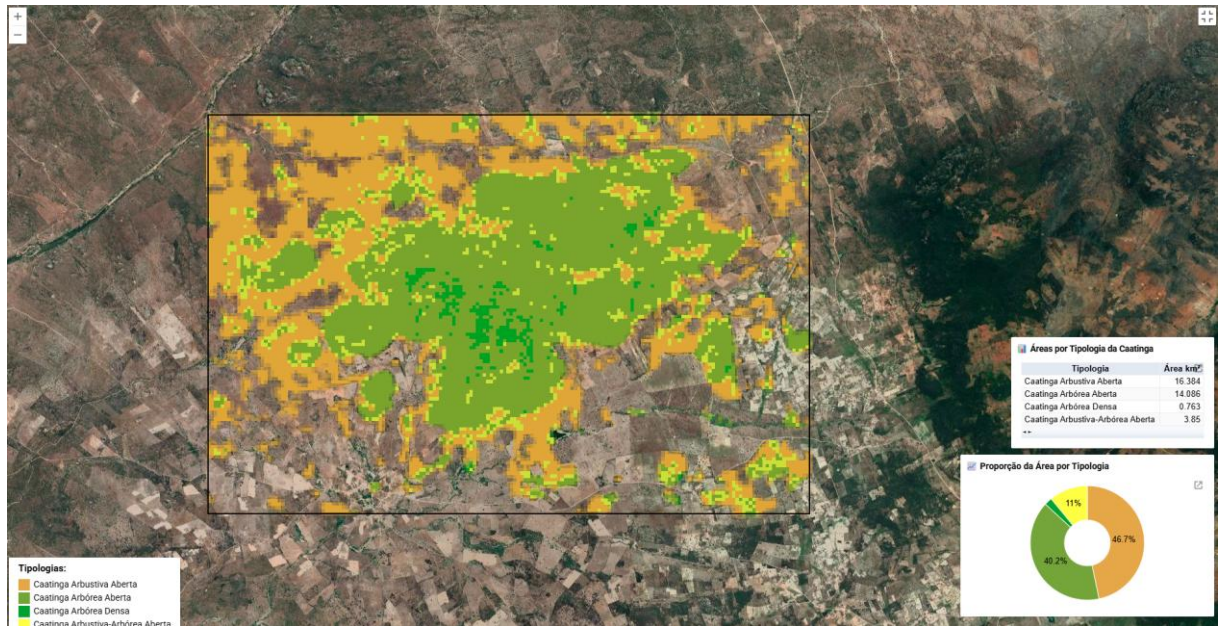
**Figura C2.2** – Etapas iniciais de uso: (1) Selecione a ferramenta de desenho (retângulo ou polígono); (2) Delimite a área de interesse diretamente sobre o mapa; (3) Escolha o ano de análise; (4) Clique no botão ‘Gerar Tipologias da Caatinga’ para iniciar o processamento.



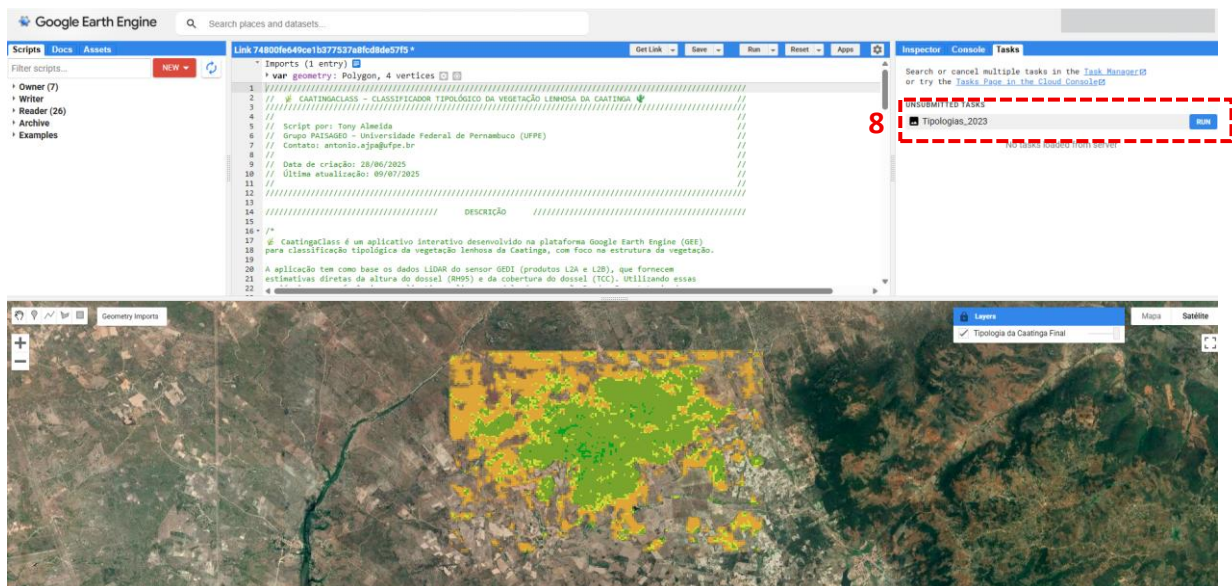
**Figura C2.3** – Pós-processamento: (5) Visualização interativa dos mapas temáticos de tipologias da Caatinga, com destaque para a distribuição espacial das formações classificadas, gráfico e estatísticas descritivas geradas automaticamente; (6) Utilize o botão “Tela Cheia” para ampliar a visualização e facilitar a análise espacial detalhada; (7) Acesse a interface avançada para explorar os dados e realizar o download de camadas.



**Figura C2.4** – Visualização dos resultados: mapas temáticos interativos de tipologia da vegetação lenhosa; gráficos com a proporção de área ocupada por cada formação; painel com dados quantitativos por tipologia, expressos em quilômetros quadrados, facilitando a interpretação da estrutura e composição da paisagem analisada.



**Figura C2.4** – Interface avançada do aplicativo: Permite maior detalhamento da visualização, acesso ao catálogo completo de imagens e (8) download dos dados processados.



### Link de Acesso

O aplicativo pode ser acessado publicamente através do seguinte link:  
<https://tonyn12.users.earthengine.app/view/caatingaclass>

## APÊNDICE D.2 – APLICATIVO CAATINGATREND: MONITOR DE TENDÊNCIAS DA VEGETAÇÃO LENHOSA DA CAATINGA

### **Descrição Geral da Aplicação**

O CaatingaTrend é um aplicativo interativo desenvolvido no ambiente Google Earth Engine Apps, voltado ao monitoramento da vegetação lenhosa da Caatinga com base em séries temporais do índice EVI (Enhanced Vegetation Index), derivado de imagens do sensor Sentinel-2 com resolução espacial de 10 metros. A aplicação cobre o período de 2016 a 2023 e realiza as análises exclusivamente sobre áreas classificadas como vegetação lenhosa da Caatinga, utilizando uma máscara temática obtida do projeto MapBiomias.

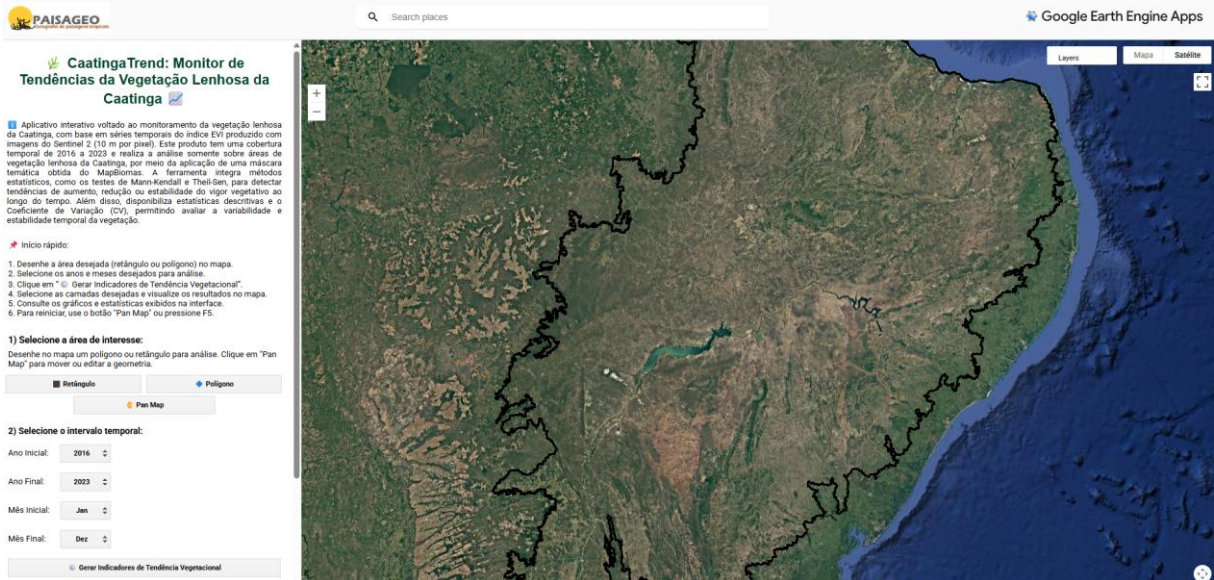
A ferramenta incorpora testes estatísticos, como o Mann-Kendall (para identificação de tendências significativas) e o estimador Theil-Sen (para o cálculo da inclinação da tendência), permitindo detectar padrões de aumento, redução ou estabilidade do vigor vegetativo ao longo do tempo. Além disso, são calculadas estatísticas descritivas e o Coeficiente de Variação (CV), possibilitando a avaliação da estabilidade temporal da vegetação lenhosa.

### **Funcionalidades Principais**

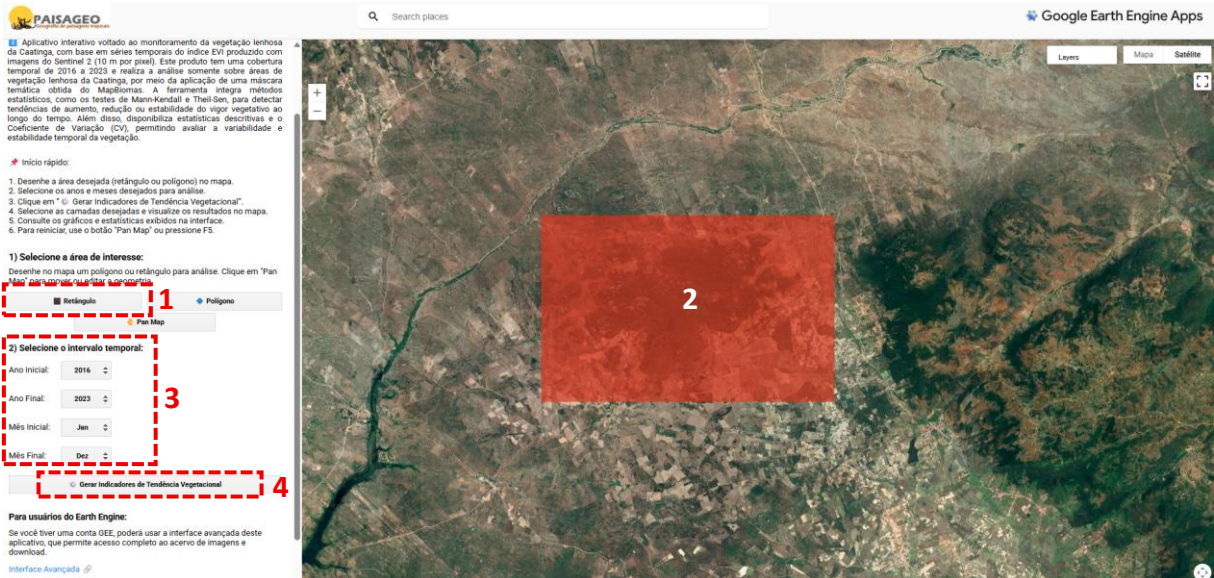
- Integração de séries temporais multianuais (2016–2023) para todas as métricas analisadas (EVI, Mann-Kendall, Sen's Slope e Coeficiente de Variação).
- Aplicação de máscara MapBiomias para restringir a análise à vegetação lenhosa da Caatinga.
- Cálculo da tendência temporal da vegetação, por meio do teste estatístico de Mann-Kendall, que identifica padrões significativos de aumento, redução ou estabilidade.
- Geração automática de estatísticas descritivas para cada uma das métricas geradas (EVI, Mann-Kendall e Coeficiente de Variação), permitindo sínteses quantitativas da dinâmica vegetacional
- Visualização de mapas temáticos interativos e gráficos temporais.

## Instruções de Uso e Interface da Plataforma

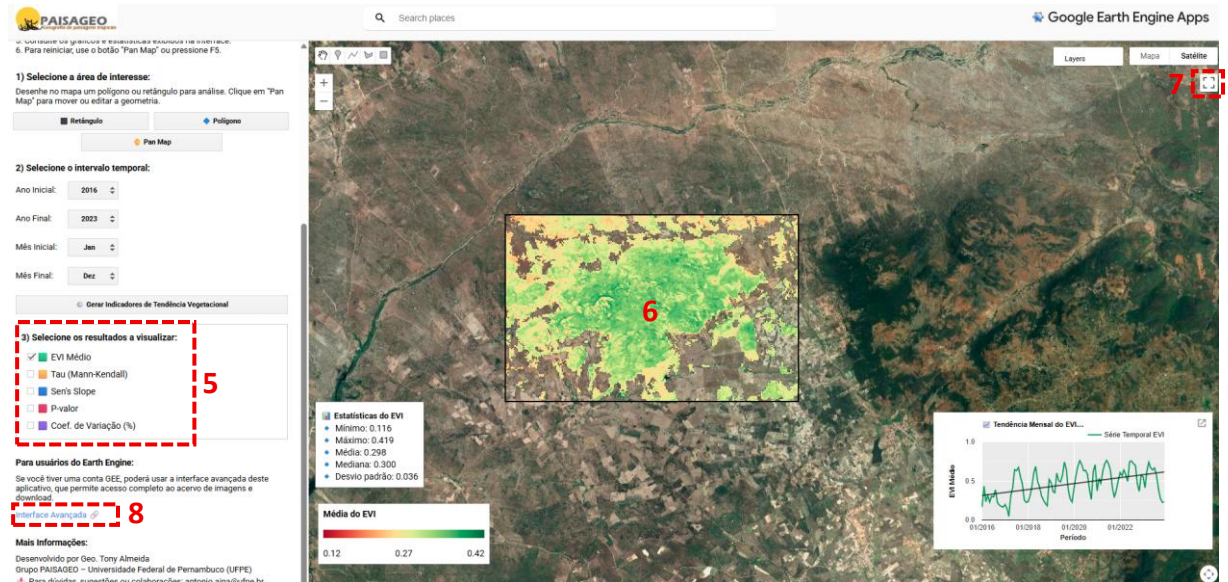
**Figura C2.1** – Visão geral da interface do aplicativo *CaatingaTrend*, desenvolvido no ambiente Google Earth Engine Apps, com painel lateral de controle e ferramentas de interação no mapa.



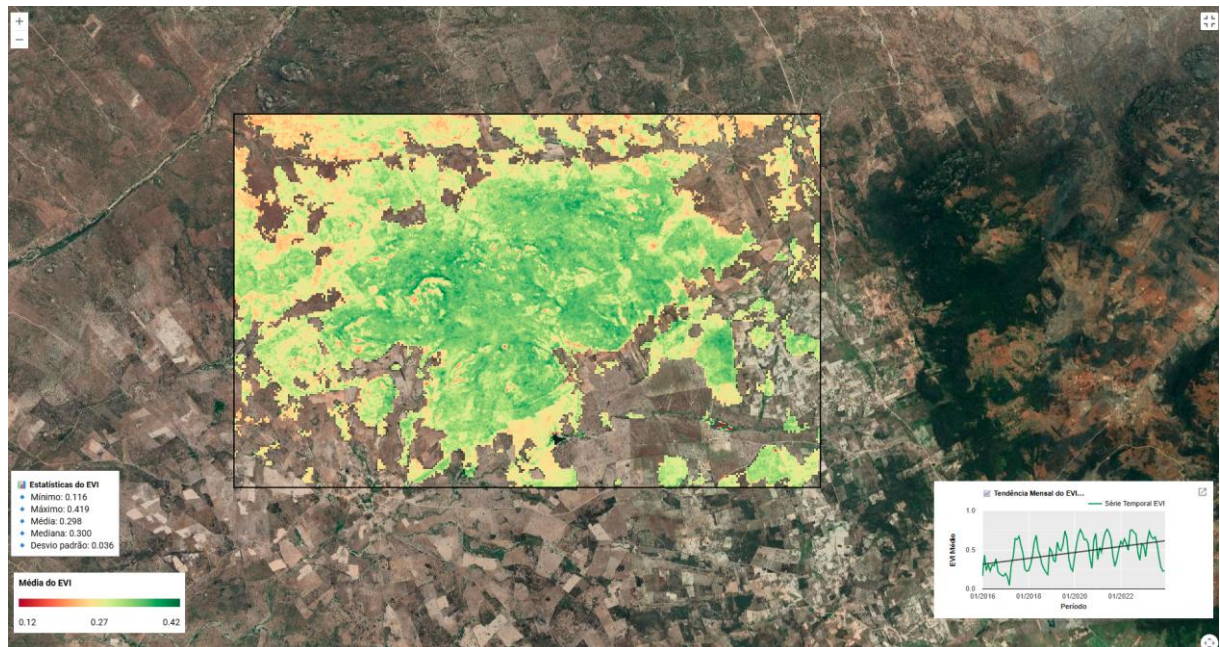
**Figura C2.2** – Etapas iniciais de uso: (1) Selecione a ferramenta de desenho (retângulo ou polígono); (2) Delimite a área de interesse diretamente sobre o mapa; (3) Escolha o intervalo temporal (anos e meses) para a análise; (4) Clique no botão ‘Gerar Indicadores de Tendência Vegetacional’ para iniciar o processamento.



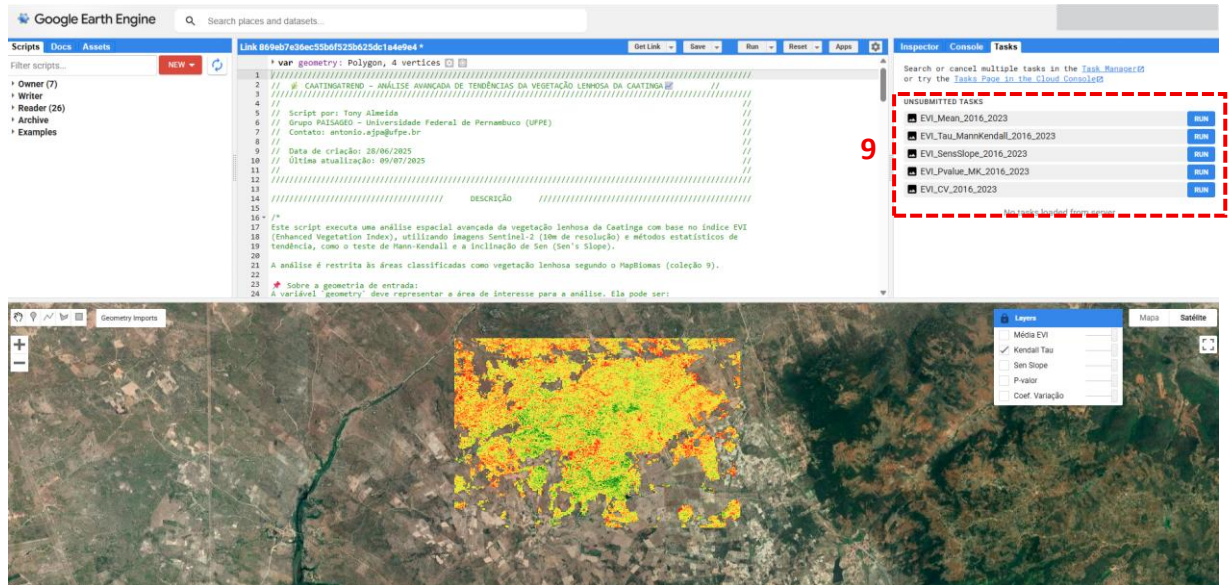
**Figura C2.3** – Pós-processamento: (5) Seleccione e ative as camadas desejadas (ex.: EVI médio, Mann-Kendall, Sen's Slope, Coeficiente de Variação); (6) Visualize os mapas temáticos, gráficos temporais e estatísticas descritivas geradas automaticamente; (7) Utilize o botão “Tela Cheia” para ampliar a visualização e facilitar a análise espacial detalhada; (8) Acesse a interface avançada para explorar os dados e realizar o download de camadas.



**Figura C2.4** – Visualização dos resultados: Gráfico temporal com tendência do EVI; Mapas temáticos interativos (tendência, coeficiente de variação); Painel com estatísticas descritivas da vegetação lenhosa na área selecionada.



**Figura C2.5** – Interface avançada do aplicativo: Permite maior detalhamento da visualização, acesso ao catálogo completo de imagens e (9) download dos dados processados.



### Link de Acesso

O aplicativo pode ser acessado publicamente através do seguinte link:

<https://tonyn12.users.earthengine.app/view/caatingatrend>

## APÊNDICE D.3 – APLICATIVO CAATINGAHIDRO: MONITOR DE RESPOSTA HÍDRICA DA VEGETAÇÃO DA CAATINGA

### Descrição Geral da Aplicação

O aplicativo CaatingaHidro foi desenvolvido como uma ferramenta interativa para estimar, visualizar e analisar indicadores eco-hidrológicos da vegetação lenhosa da Caatinga. A plataforma é baseada no ambiente Google Earth Engine Apps e integra múltiplas métricas derivadas de sensores remotos, oferecendo uma abordagem robusta para o monitoramento ambiental em regiões semiáridas.

O sistema permite a exploração espacial e temporal de indicadores de produtividade vegetal e disponibilidade hídrica. Entre as métricas de produtividade estão o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), que expressa o vigor vegetativo, e a RUE (*Rain Use Efficiency*), que indica a eficiência do uso da precipitação pela vegetação. No componente hidrológico, são incorporadas:

- Precipitação acumulada da série CHIRPS, com suavização por filtro focal;
- Evapotranspiração real (ET), estimada via modelo SEBAL;
- Temperatura da Superfície (LST), como indicador de estresse térmico;
- Umidade superficial do solo (SSM), calculada a partir do modelo espectral OPTRAM.

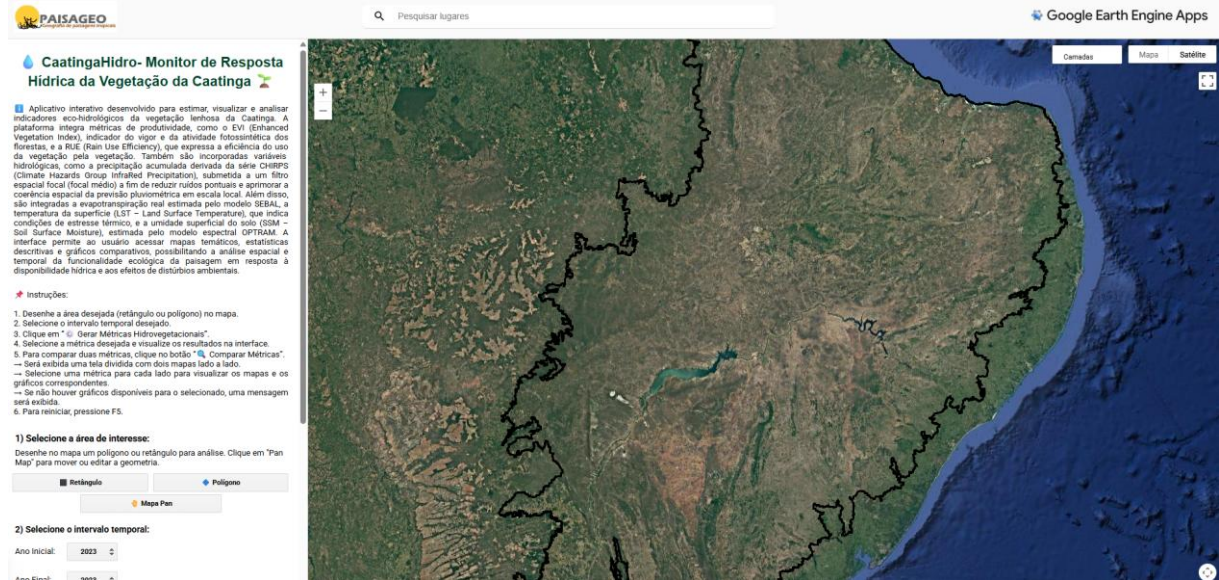
A interface do aplicativo permite ao usuário gerar mapas temáticos e gráficos interativos, além de comparar métricas lado a lado. Isso possibilita uma análise integrada e dinâmica da funcionalidade ecológica da vegetação frente às variações climáticas e aos distúrbios antrópicos.

### **Funcionalidades Principais**

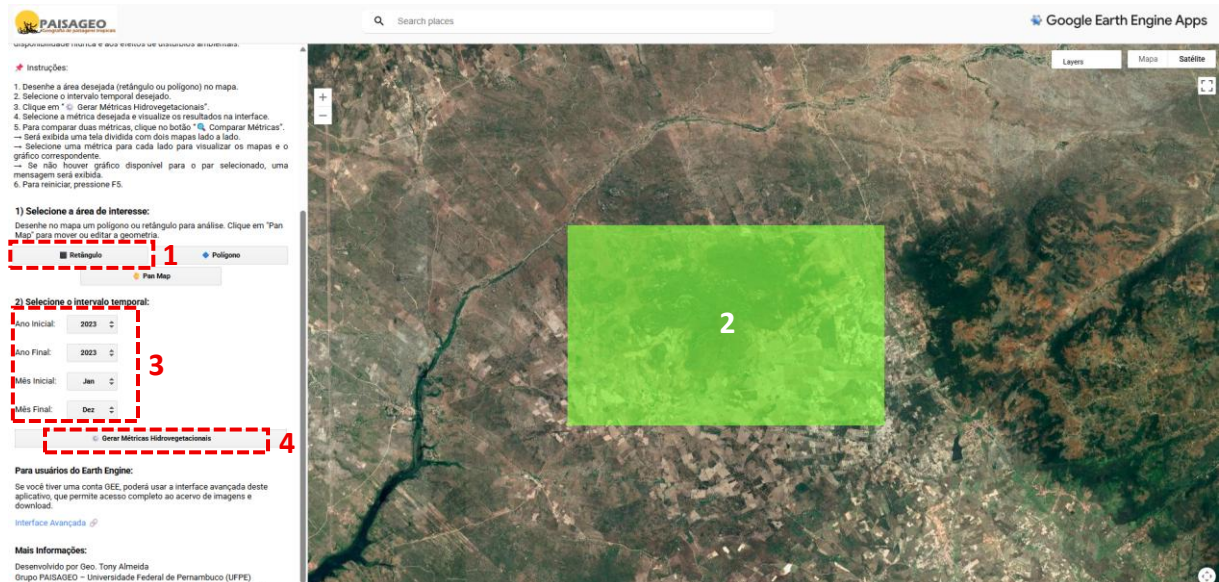
- Integração de múltiplas métricas eco-hidrológicas derivadas de sensores remotos (2016–2023), incluindo EVI, RUE, precipitação (CHIRPS), evapotranspiração (SEBAL), temperatura da superfície (LST) e umidade superficial do solo (OPTRAM).
- Aplicação de máscara temática do MapBiomias para restringir a análise exclusivamente às áreas de vegetação lenhosa da Caatinga.
- Geração de mapas temáticos interativos, com visualização espacial das métricas selecionadas para diferentes períodos.
- Cálculo automático de estatísticas descritivas (média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão) para cada métrica selecionada.
- Ferramenta de comparação entre métricas, com visualização simultânea em tela dividida (SplitPanel) e geração de gráficos combinados.
- Análise temporal por meio de gráficos mensais comparativos das métricas selecionadas, facilitando a avaliação conjunta dos indicadores ao longo do tempo.

## Instruções de Uso e Interface da Plataforma

**Figura C3.1** – Visão geral da interface do aplicativo *CaatingaHidro*, desenvolvido no ambiente Google Earth Engine Apps, com painel lateral de controle e ferramentas de interação no mapa.

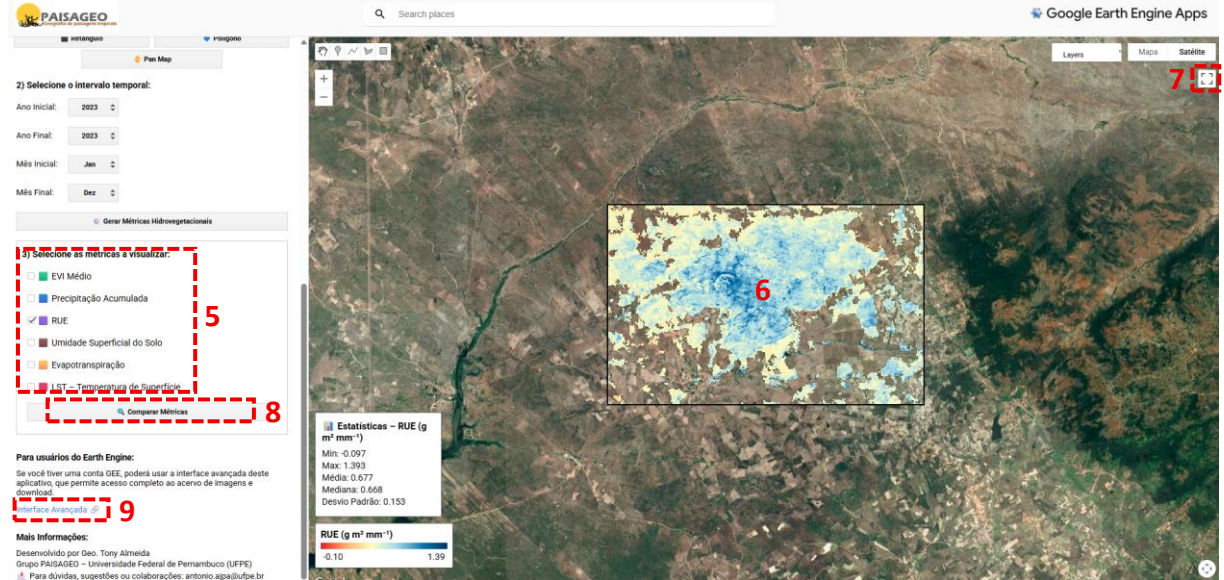


**Figura C3.2** – Etapas iniciais de uso: (1) Selecione a ferramenta de desenho (retângulo ou polígono); (2) Delimite a área de interesse diretamente sobre o mapa; (3) Escolha o intervalo temporal (anos e meses) para a análise; (4) Clique no botão “Gerar Métricas Hidrovegetacionais” para iniciar o processamento.

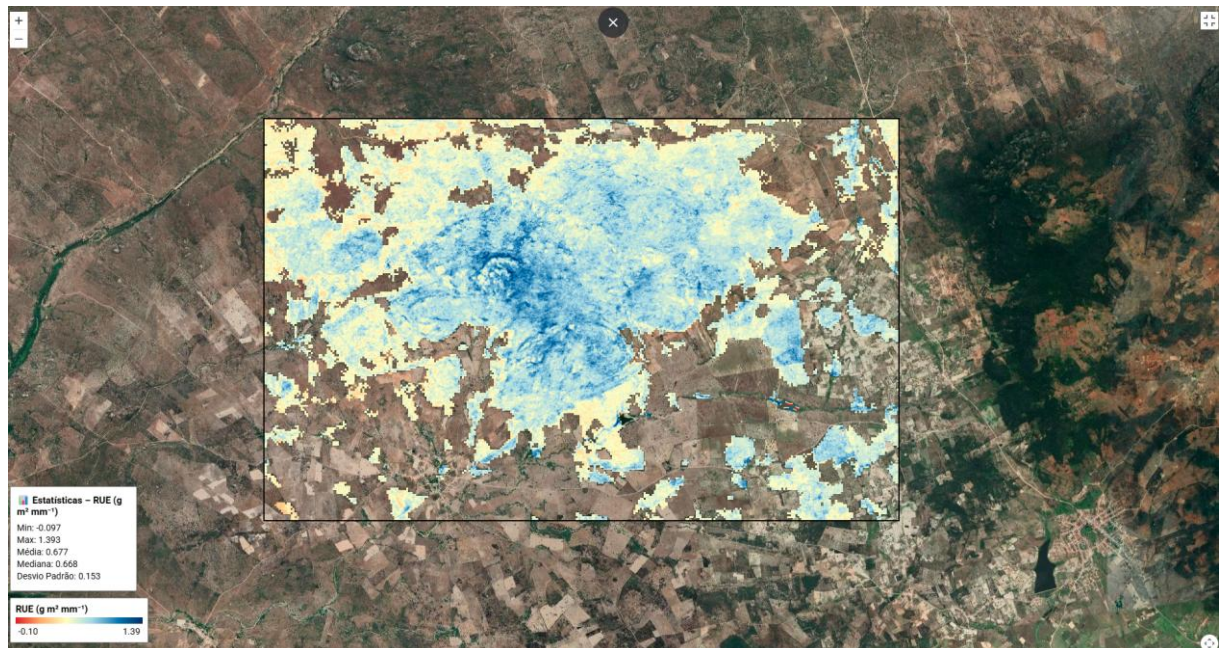




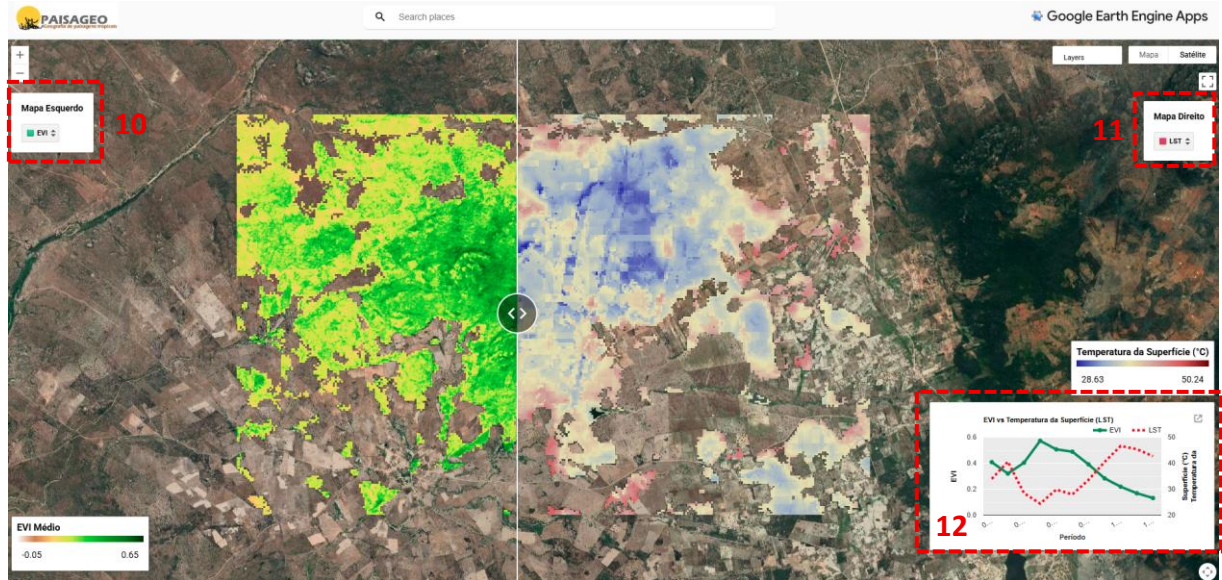
**Figura C3.3** – Pós-processamento: (5) Seleção e ative as camadas desejadas (ex.: EVI, Precipitação, RUE, Umidade Superficial do Solo, Evapotranspiração e LST); (6) Visualize os mapas temáticos e estatísticas descritivas geradas automaticamente; (7) Utilize o botão “Tela Cheia” para ampliar a visualização e facilitar a análise espacial detalhada; (8) Ativa a interface dividida (SplitPanel) para análise comparativa entre duas métricas e geração de gráfico combinado; (9) Acesse a interface avançada para explorar os dados e realizar o download de camadas.



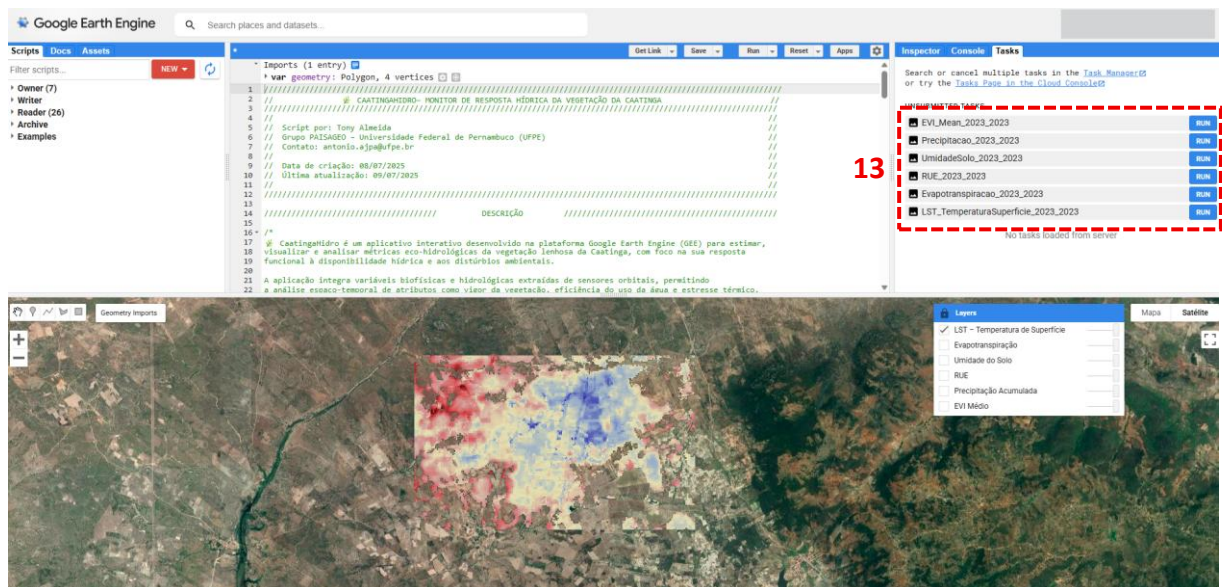
**Figura C3.4** – Visualização dos resultados: Mapas temáticos interativos; Painel com estatísticas descritivas da vegetação lenhosa na área selecionada.



**Figura C2.5** – Interface comparativa de métricas hidrovegetacionais (SplitPanel): (10) Selecione a métrica hidrovegetacional do mapa esquerdo por meio do menu suspenso; (11) Selecione a métrica do mapa direito para análise comparativa; (12) A interface exibirá mapas lado a lado sincronizados com barra deslizante (SplitPanel), e o gráfico gerado automaticamente mostra a comparação temporal das duas métricas selecionadas com valores mensais agregados.



**Figura C2.6** – Interface avançada do aplicativo: Permite maior detalhamento da visualização, acesso ao catálogo completo de imagens e (9) download dos dados processados.



## Link de Acesso

O aplicativo pode ser acessado publicamente através do seguinte link:

<https://tonyn12.users.earthengine.app/view/caatingahidro>

## APÊNDICE D.4 – APLICATIVO CAATINGAFENO: MONITOR FENOLÓGICO DA CAATINGA

### Descrição Geral da Aplicação

O aplicativo CaatingaFeno é uma ferramenta interativa desenvolvida para estimar, visualizar e analisar as métricas fenológicas da vegetação lenhosa da Caatinga, com base no conceito de Land Surface Phenology (LSP). Utilizando séries temporais do índice EVI (Enhanced Vegetation Index), obtidas a partir de imagens Sentinel-2 com resolução espacial de 10 metros, o sistema identifica eventos sazonais fundamentais da vegetação:

- SOS (Start of Season) – Início da estação de crescimento;
- POS (Peak of Season) – Pico da atividade fotossintética;
- EOS (End of Season) – Fim do ciclo vegetativo;
- LOS (Length of Season) – Duração da estação de crescimento.

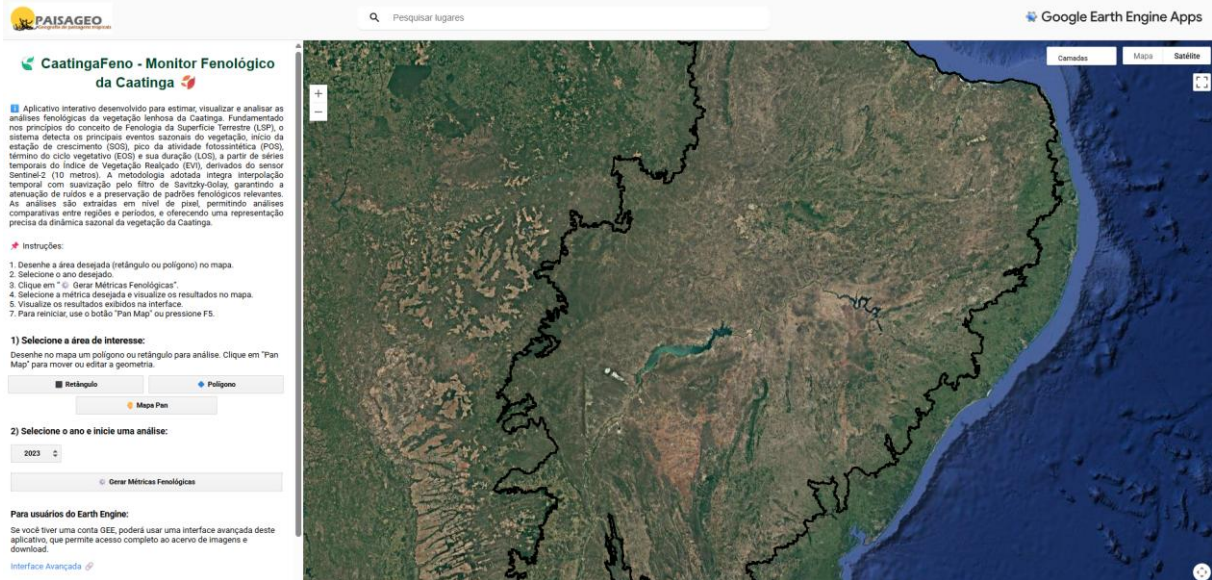
A metodologia aplicada integra interpolação temporal e suavização de séries com filtro de Savitzky-Golay, assegurando a redução de ruídos e a preservação de padrões fenológicos característicos da vegetação semiárida. As métricas são extraídas em nível de pixel, possibilitando uma representação detalhada da dinâmica sazonal da vegetação, e permitindo análises comparativas entre regiões, anos e formações vegetacionais.

### Funcionalidades Principais

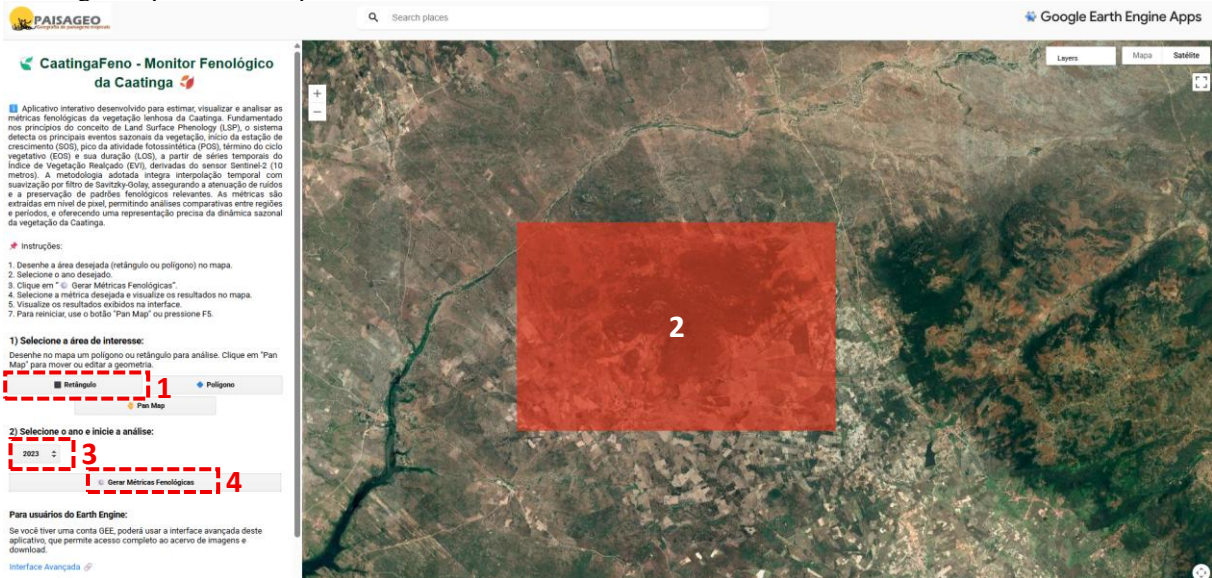
- Geração de mapas temáticos interativos, com visualização das métricas fenológicas selecionadas (SOS, POS, EOS, LOS) por ano de interesse.
- Extração pixel a pixel das métricas fenológicas, permitindo análises espacialmente detalhadas e comparações entre diferentes regiões e anos.
- Análise temporal por meio da visualização da curva fenológica anual com destaque para as datas médias das métricas LSP (SOS, EOS e POS) e painel que exhibe as datas médias de cada evento fenológico

## Instruções de Uso e Interface da Plataforma

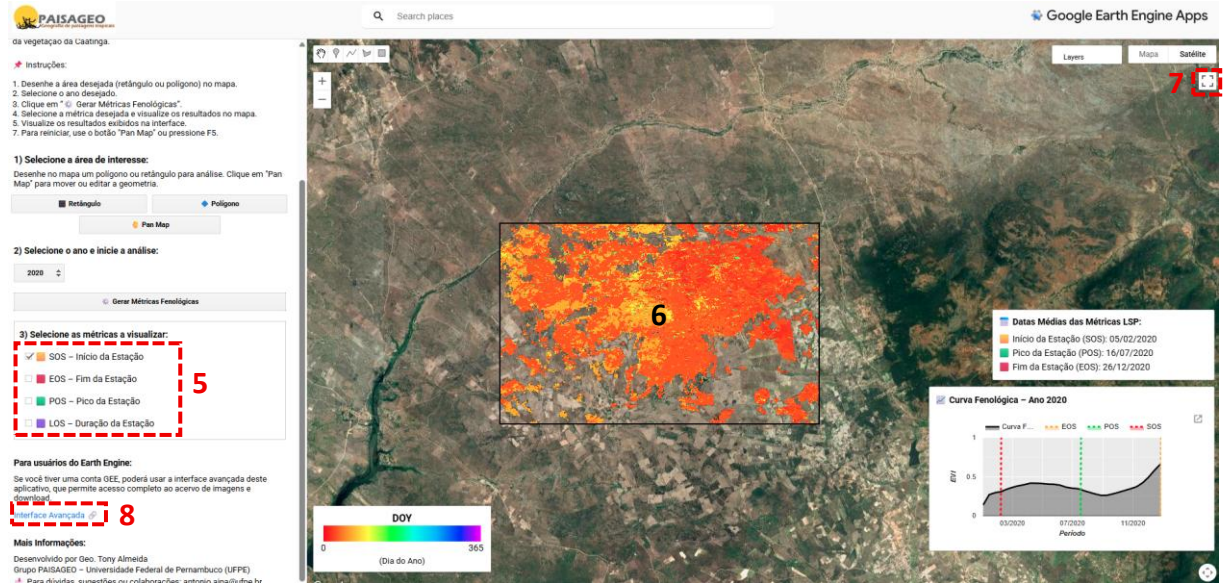
**Figura C4.1** – Visão geral da interface do aplicativo *CaatingaFeno*, desenvolvido no ambiente Google Earth Engine Apps, com painel lateral de controle e ferramentas de interação no mapa.



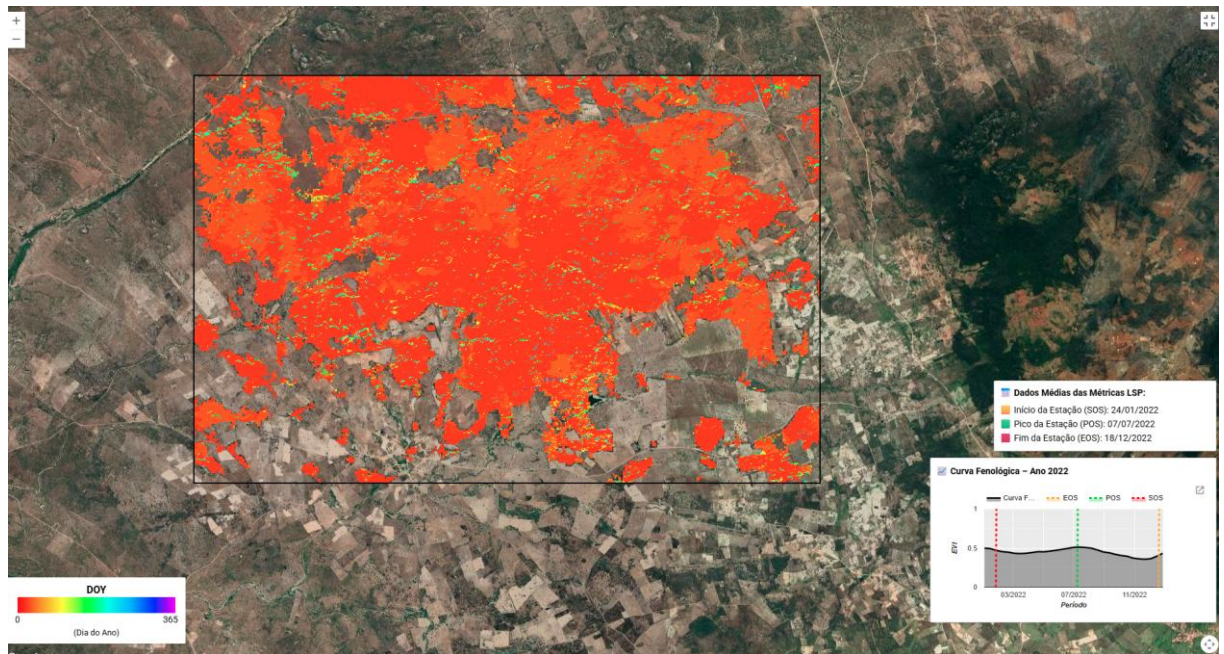
**Figura C4.2** – Etapas iniciais de uso: (1) Seleção da ferramenta de desenho (retângulo ou polígono); (2) Delimite a área de interesse diretamente sobre o mapa; (3) Escolha o ano de análise; (4) Clique no botão 'Gerar Métricas Fenológicas' para iniciar o processamento.



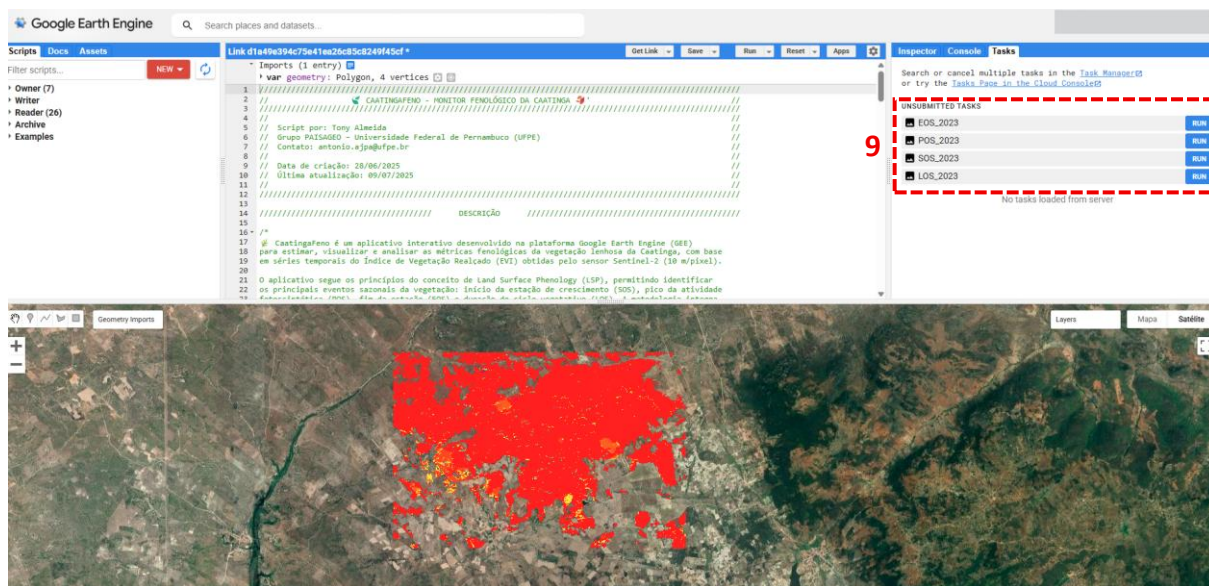
**Figura C4.3** – Pós-processamento: (5) Selecione e ative as métricas fenológicas desejadas (ex.: SOS, EOS, POS e LOS); (6) Visualize os mapas temáticos, gráficos temporais e estatísticas descritivas geradas automaticamente; (7) Utilize o botão “Tela Cheia” para ampliar a visualização e facilitar a análise espacial detalhada; (8) Acesse a interface avançada para explorar os dados e realizar o download de camadas.



**Figura C4.4** – Visualização dos resultados: Gráfico da curva fenológica anual com destaque para as datas médias das métricas LSP (SOS, EOS e POS); Mapas temáticos interativos; Painel com as datas médias de cada evento fenológico da área selecionada.



**Figura C4.5** – Interface avançada do aplicativo: Permite maior detalhamento da visualização, acesso ao catálogo completo de imagens e (9) download dos dados processados.



### Link de Acesso

O aplicativo pode ser acessado publicamente através do seguinte link:

<https://tonyn12.users.earthengine.app/view/caatingafeno>