



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA - CCEN
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS - DGEO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PPGG
CURSO DE DOUTORADO**

ELÂNIA DANIELE SILVA ARAÚJO

**REGIMES DE PRECIPITAÇÃO E DINÂMICA DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES CONTEXTOS
GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICOS EM AMBIENTE TROPICAL SEMIÁRIDO – CAATINGA
NO ALTO SERTÃO PARAIBANO**

João Pessoa
Fevereiro de 2024

Elânia Daniele Silva Araújo

**REGIMES DE PRECIPITAÇÃO E DINÂMICA DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES
CONTEXTOS GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICOS EM AMBIENTE TROPICAL
SEMIÁRIDO – CAATINGA NO ALTO SERTÃO PARAIBANO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Geografia, sob orientação do Prof. Dr. Jonas Otaviano de Praça Souza.

Área de concentração: Território, Trabalho e Ambiente.

Linha de pesquisa: Gestão do Território e Análise Geoambiental.

João Pessoa
Fevereiro de
2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A663r Araújo, Elânia Daniele Silva.

Regimes de precipitação e dinâmica da vegetação em diferentes contextos geológico-geomorfológicos em ambiente tropical semiárido : Caatinga no Alto Sertão paraibano / Elânia Daniele Silva Araújo. - João Pessoa, 2024.

148 f. : il.

Orientação: Jonas Otaviano Praça de Souza.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Geologia e geomorfologia - Alto Sertão paraibano.
2. Índices de vegetação. 3. Sazonalidade. 4. Comportamento da vegetação. 5. Vegetação de Caatinga.
6. Precipitação pluviométrica. I. Souza, Jonas Otaviano Praça de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 551+551.4(043)



**“REGIMES DE PRECIPITAÇÃO E DINÂMICA DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES
CONTEXTOS GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICOS EM AMBIENTE TROPICAL
SEMIÁRIDO – CAATINGA NO ALTO SERTÃO PARAIBANO”**

por

Elânia Daniele Silva Araújo

**Tese de Doutorado apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em
Geografia do CCEN-UFPB, como requisito total para obtenção do grau de Doutora em
Geografia.**

Área de concentração: Território, trabalho e Ambiente.

Aprovado por:



Documento assinado digitalmente
JONAS OTAVIANO PRAÇA DE SOUZA
Data: 11/03/2024 17:30:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jonas Otaviano Praça de Souza
Orientador



Documento assinado digitalmente
BARTOLOMEU ISRAEL DE SOUZA
Data: 11/03/2024 14:57:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza
Examinador interno



Documento assinado digitalmente
EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA
Data: 11/03/2024 14:19:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima
Examinador externo


Prof. Dr. Gerardo Arturo Sanchez Azofeifa
Examinador externo



Documento assinado digitalmente
LUCAS COSTA DE SOUZA CAVALCANTI
Data: 11/03/2024 10:51:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Costa de Souza Cavalcanti
Examinador externo

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-graduação em Geografia
Cursos de Mestrado e Doutorado em Geografia**

Fevereiro/2024.

*Aos meus avós Hélio e Sueli (In memoriam);
A minha filha amada Alane Sophi;
A toda minha Família;
A todas as meninas e meninos negros, de periferia e
advindos da educação pública, assim como eu*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Traçar uma jornada acadêmica enquanto mulher, negra, de zona rural e de educação pública não é uma tarefa fácil. Não foi fácil chegar aqui e, certamente, sozinha, eu não teria chegado. Por isso, é essencial e primordial traçar os agradecimentos a todos que seguraram a minha mão, não apenas nestes quatro anos, mas ao longo de toda a minha caminhada geográfica.

A Deus, por me ouvir pedir forças a cada noite e por me proporcionar experimentar essa força inexplicável a cada amanhecer, assim foram os quatro anos deste trabalho acadêmico. Obrigada Pai!

A minha filha amada, Alane Sophi, a pequena flor que dá cor e perfume ao jardim da minha vida. Obrigada por compreender a ausência da mamãe em alguns momentos, mas, principalmente, por me fortalecer com seu sorriso radiante todos os dias.

Aos meus avós Hélio e Sueli (*In memoriam*), por tudo e por tanto. Jamais seria metade do que sou hoje sem vocês, sem os ensinamentos, o incentivo e o amor incondicional que me proporcionaram. Como eu queria que estivessem aqui agora, mas onde quer que estejam, saibam: eu consegui, e foi por vocês.

A minha mãe, Eliane, por toda ajuda, apoio, incentivo, amor e pela força que a senhora transmite. Aprendi a lutar porque a vi lutando, mainha; sua força e garra me encorajam cada dia mais.

Ao meu pai, Antônio, pelo apoio, incentivo, amor e por acreditar nos meus sonhos ao meu lado.

As minhas irmãs Emanuele, Gabrieli e Lorrane, agradeço por me ajudarem de diversas maneiras, mas principalmente pelo amor de vocês em minha vida. Cada bobagem dita e cada sorriso arrancado do meu rosto descontraíu os momentos tensos. E ao meu irmão Anthuny, que mesmo distante emana um intenso amor fraterno.

A toda a minha família, Elielson, Aluska, Samyلة, Agda, Manoel, Angêla, Charles, Ricardo, Sandra, Luciano, Nereid, Lucélia, Arthur, vovó Terezinha e aos pequenos Malu, Enzo, Ravi e Oliver, por serem a expressão mais profunda de amor e carinho em minha vida.

Ao meu querido orientador Jonas Souza, pela paciência, apoio, incentivo e construção de conhecimento desde o mestrado, você me inspira a ir mais além.

A minha eterna orientadora, hoje, parte da minha família, Janaína, por me inserir no universo da pesquisa, por me incentivar, acreditar no meu potencial e me aconselhar muito ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

A todos os meus amigos da Geografia que caminharam comigo desde a graduação, especialmente a Graciele, minha irmã geográfica, Taynan e Felipe por acompanharem e por também viverem os anseios da pós-graduação, mas principalmente por estarem sempre ao meu lado, por nunca

terem se distanciado e por serem amigos verdadeiros.

Aos amigos e amigas Alecio, Lucenilda, Manu, Suelania, Ian, David, Waleska, Julia, Maruska e Lais pela força e incentivo na construção deste trabalho, mas principalmente por compartilharem bons momentos, a vida com vocês é mais leve.

Ao Grupo de Estudo em Ambientes Fluviais Semiáridos – GEAFS, pelo acolhimento, apoio e compartilhamento de conhecimentos, desde o mestrado.

Aos amigos Daniel e Gabriel, por toda ajuda, paciência e ensinamentos estatísticos, vocês foram essenciais.

Aos amigos que o GEAFS me deu Camila e André, pelas conversas compartilhadas, os levarei por toda a vida.

Ao Grupo de Pesquisa em Cartografia, Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto – CAGEOS, pela parceria e por continuar me acolhendo.

Aos professores de Geografia da UFCG que me recebem sempre que preciso voltar.

A professora Célia, que está disposta a me ajudar sempre que preciso e que tanto me inspira na trajetória acadêmica.

Aos professores da banca, Bartolomeu Israel de Souza, Eduardo Viana, Lucas Cavalcanti e Arturo Sánchez-Azofeifa por suas valiosas contribuições ao longo da construção desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGG-UFPB, pela oportunidade e por me receber desde o mestrado.

Aos professores do PPGG-UFPB, pela construção de novos conhecimentos em Geografia.

As políticas públicas educacionais criadas no Brasil durante os governos do Presidente Luís Inácio Lula da Silva e da Presidenta Dilma Rousseff que abriram as portas das universidades e deram a oportunidade a pessoas de classes menos favorecidas de buscar alcançar seus sonhos por meio da Educação.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente na construção desta pesquisa.

Meus Sinceros Agradecimentos!

“Gosto de ser gente porque, inacabado, sei que sou um ser condicionado, mas consciente do inacabamento, sei que posso ir mais além dele.”

Paulo Freire

RESUMO

As regiões semiáridas tropicais se caracterizam pela sazonalidade das condições climáticas que alternam entre períodos secos e chuvosos. Assim, a vegetação nessas áreas desenvolveu adaptações que se ajustam a esse ciclo sazonal. A sazonalidade climática, especialmente da precipitação, influencia a sazonalidade da vegetação, fazendo com que, o ciclo de crescimento anual da vegetação tenha relação direta com a precipitação. Além da precipitação, a sazonalidade da vegetação dependerá de outros fatores, como: características litológicas, topográficas, dos tipos de arranjos vegetais, propriedades do solo, ou a combinação desses fatores. As Florestas Tropicais Sazonalmente Secas - FTSS, apresentam um padrão típico do ciclo fenológico anual, com valores influenciados pelo ciclo de chuvas e que são delimitados pelos parâmetros fenológicos de início e fim da estação chuvosa. O estudo da correlação entre dinâmica dessa vegetação e a precipitação é de suma importância, pois permitirá a identificação do período de maior influência da precipitação em seu comportamento. Assim, o objetivo desta pesquisa é entender o comportamento dos arranjos de vegetação de Caatinga em diferentes contextos geológico-geomorfológicos do Alto Sertão da Paraíba, a partir da sua correlação com os dados pluviométricos. Dentre os procedimentos metodológicos utilizados destaca-se a obtenção dos dados litológicos, topográficos, de precipitação e vegetação, utilizando imagens de satélite e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN. Como base para as análises, foram consideradas as áreas classificadas como vegetação nativa pelo Mapbiomas próximas a postos pluviométricos. Realizaram-se análises estatísticas utilizando a *clusterização*, correlação de *Pearson* e Regressão Linear simples, entre os dados do IVDN e os acumulados de precipitação, nos diferentes contextos geológico-geomorfológicos. Identificou-se que as áreas com arranjos vegetais preservados apresentaram as maiores médias de IVDN. Essas áreas estavam principalmente inseridas em litologia de complexos granitoides, com altitudes e declividades mais elevadas. As áreas mais degradadas apresentaram as menores médias de IVDN. Foram áreas predominantemente com altitudes e declividades médias e baixas, maioria de litologia metassedimentar e areia/arenito. Foram feitas quatro *clusterizações*, com dados geológico-geomorfológicos, de precipitação e de vegetação, de forma separada, e uma que abarcou todas essas variáveis juntas. As *clusterizações* se mostraram eficazes e permitiram identificar áreas com comportamentos próximos e distintos da vegetação, a partir das diversas variáveis utilizadas. As quatro *clusterizações* expressaram o comportamento da vegetação em cenários diferentes, os agrupamentos feitos com as variáveis separadamente, apresentaram uma maior homogeneidade entre as áreas, já o agrupamento que levou em consideração todas as variáveis juntas mostrou uma variação maior, principalmente com relação as altitudes, declividades e litologias. A relação entre a precipitação e a vegetação se mostrou indissociável e essa foi a variável que mais mostrou influência no comportamento da Caatinga. A maioria das áreas degradadas apresentaram uma resposta mais rápida a precipitação acumulada, enquanto as áreas com maior diversidade e com as maiores médias de IVDN, tiveram uma resposta mais alongada. Os valores de R^2 foram maiores nas *clusterizações* em que as variáveis foram usadas de forma separada. Já para aquela que envolvia todas as variáveis, os valores foram menores. As regressões mostraram que é possível prever o comportamento sazonal da vegetação de Caatinga. No entanto, são necessárias pesquisas futuras que aprimorem os modelos de regressão e testem outros modelos, buscando melhorar as previsões para as FTSS em cenários geológico-geomorfológicos distintos. Isso porque essas variáveis são importantes e influenciam no comportamento da vegetação, mas estatisticamente elas diminuem a precisão dos modelos. São necessários estudos mais aprofundados que possam aliar os dados fenológicos e fitossociológicos aos dados estimados por sensores, para que haja um melhor entendimento do comportamento sazonal das FTSS.

Palavras-chave: Índices de vegetação; sazonalidade; comportamento vegetacional, correlação.

ABSTRACT

The tropical semi-arid regions are characterized by the seasonality of rains alternating between dry and rainy periods. Thus, vegetation in these areas has developed adaptations that align with this seasonal cycle. Climate seasonality, especially precipitation, influences vegetation seasonality, causing the annual growth cycle of vegetation to be directly related to precipitation. In addition to precipitation, vegetation seasonality depends on other factors such as lithological and topographic characteristics, types of vegetation arrangements, soil properties, or a combination of these factors. Seasonally Dry Tropical Forests (SDTF) exhibit a typical pattern of the annual phenological cycle, with values influenced by the rainy season and delimited by phenological parameters marking the beginning and end of the rainy season. Studying the correlation between the dynamics of this vegetation and precipitation is of paramount importance, as it allows the identification of the period of the most significant influence of precipitation on its behavior. Therefore, this research aims to understand the behavior of Caatinga vegetation arrangements in different geological-geomorphological contexts of the Alto Sertão of Paraíba based on their correlation with precipitation data. Among the methodological procedures used, obtaining lithological, topographic, precipitation, and vegetation data stands out, using satellite images and the Normalized Difference Vegetation Index – NDVI. As a basis for the analyses, areas classified as native vegetation by Mapbiomas were considered. Statistical analyses were conducted using clustering, Pearson correlation, and simple linear regression between NDVI data and cumulative precipitation in different geological-geomorphological contexts. Areas with preserved vegetation arrangements were identified with the highest NDVI averages. These areas were mainly in granitoid complex lithology, with higher altitudes and slopes. Degraded areas had the lowest NDVI averages, predominantly featuring medium to low altitudes and slopes, with most metasedimentary lithology and sand/sandstone. Four clusterings were performed with geological-geomorphological, precipitation, and vegetation data separately, and one encompassed all these variables together. The clusterings proved effective, identifying areas with similar and distinct vegetation behaviors based on the variables used. The four clusterings expressed the behavior of vegetation in different scenarios. Groupings made with variables separately showed greater homogeneity among areas, while the grouping considering all variables exhibited more variation, especially concerning altitudes, slopes, and lithologies. The relationship between precipitation and vegetation proved inseparable, with precipitation being the variable that most influenced the behavior of Caatinga. Degraded areas showed a faster response to cumulative precipitation, while areas with greater diversity exhibited a slower response. R values were higher in clusterings where variables were used separately. For those involving all variables, the values were lower. Regressions showed that it is possible to predict the seasonal behavior of Caatinga vegetation. However, future research is needed to improve regression models and test other models to enhance predictions for SDTF in different geological-geomorphological scenarios. This response happens because these variables are important and influence vegetation behavior, but statistically, they reduce the precision of the models. More in-depth studies are required to integrate phenological and phytosociological data with estimates from sensors for a better understanding of the seasonal behavior of SDTF.

Keywords: Vegetation indices; seasonality; biomass; vegetation behavior.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
OBJETIVOS	20
Objetivo Geral	20
Objetivos Específicos	20
HIPÓTESE	20
CAPÍTULO I	21
1.1. Ambientes Tropicais Semiáridos	22
1.2. Florestas Secas e Sazonalidade Climática	23
1.3. Caatinga: Floresta Tropical Sazonalmente Seca	29
1.4. Índices de vegetação e monitoramento de áreas secas e vegetação sazonal	33
1.4.1. Índices de vegetação (IV)	36
1.4.2. Sensores e métodos utilizados para o monitoramento de áreas secas e vegetação sazonal	40
1.4.2.1. Métodos estatísticos para o monitoramento de áreas secas e vegetação sazonal	46
CAPÍTULO II	48
2.1. Localização da área de estudo	49
2.1.1. Caracterização Geoambiental	50
2.2. Metodologia	59
2.2.1. Mapeamento Temático	59
2.2.2. Análise exploratória para escolha dos pontos	60
2.2.3. Extração dos dados Geológico-geomorfológicos para os <i>buffers</i>	60
2.2.4. Índice topográfico de Umidade (ITU)	61
2.2.5. Análise do comportamento da vegetação	61
2.2.6. Análise da precipitação	63
2.2.6.1. Análise dos Acumulados de precipitação antes do imageamento por satélite	64
2.2.6.2. Análise dos Dias de Chuva	64
2.2.6.3. Identificação dos anos Secos, Chuvosos e Habituais	65
2.2.7. Análises Estatísticas	66
2.2.7.1. Análise de Clustering	66
2.2.7.2. Correlação estatística entre os dados de Vegetação e Precipitação	69
2.2.8. Trabalho de campo	70
3. CAPÍTULO III	71
3.1. Descrição dos <i>Buffers</i> Analisados	71
3.2. Caracterização Geológico-Geomorfológica	80

3.2.6.	Análise de <i>Clustering</i> para variáveis Geológico-geomorfológicas	84
3.3.	Análise da variabilidade da precipitação	88
3.3.1.	Análise de <i>Clustering</i> para variáveis de Precipitação.....	92
3.4.	Análise geral da sazonalidade da vegetação	95
3.4.1.	Análise de <i>Clustering</i> para variáveis do IVDN	103
3.5.	Correlação entre a sazonalidade da vegetação e a precipitação	106
3.6.	Regressões	109
3.6.1.	Análise de <i>Clustering</i> para todas as variáveis	109
3.6.2.	Regressões por <i>cluster</i>	112
4.	CAPÍTULO IV	117
4.3.	Influência dos parâmetros Geológicos-Geomorfológicos.....	118
4.4.	Análise da variabilidade da precipitação	120
4.5.	Análise geral da sazonalidade da vegetação.....	122
4.6.	Correlação entre a sazonalidade da vegetação e a precipitação	125
4.7.	Regressão Linear	128
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
	REFERÊNCIAS	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das florestas tropicais no mundo.....	25
Figura 2. Distribuição das Florestas e arbustais tropicais sazonalmente secas na região neotropical	28
Figura 3: Localização do Alto Sertão – PB e dos postos pluviométricos da área	49
Figura 4. Mapa de Geologia e Litologia.....	51
Figura 5. Mapa de Altimetria (m).....	52
Figura 6. Mapa de Declividade (%).....	53
Figura 7. Mapa de Geomorfologia	55
Figura 8. Mapa de Drenagem	56
Figura 9. Mapa de Precipitação média anual (mm) 1996-2022	58
Figura 10. Método do Cotovelo para escolha de K para: A. <i>clusterização</i> Geológico-geomorfológica. B. <i>clusterização</i> da Precipitação; C. <i>clusterização</i> do IVDN; D. <i>clusterização</i> para todas as variáveis.....	68
Figura 11. A. Vegetação no <i>buffer</i> ID31 no período seco; B. Espécie de Catingueira; C. Espécie de Jurema-preta	74
Figura 12. A. Vegetação no <i>buffer</i> ID13 no período seco; B. Árvores cortadas; C. Área queimada.....	75
Figura 13 A, B e C. Vegetação no <i>buffer</i> ID30 no período seco.....	76
Figura 14. A e B. Vegetação no <i>buffer</i> ID34 no período chuvoso	77
Figura 15 A,B e C. Vegetação no <i>buffer</i> ID29 no período seco.....	78
Figura 16. A. Vegetação no <i>buffer</i> ID39 no período seco; B. Espécies de Jurema-preta; C. Espécies de Marmeleiro	79
Figura 17. Litologia, Altitude (m), Declividade (%) e Índice Topográfico de Umidade (ITU) dos <i>buffers</i>	81
Figura 18. A. Afloramentos de rochas no ID28. B e C. Afloramento de rochas no ID41	83
Figura 19. Clusters baseados nas características geológico-geomorfológicas	84
Figura 20. Espacialização dos <i>clusters</i> baseados nas características geológico-geomorfológicas.....	87
Figura 21. Precipitação média (mm) dos <i>buffers</i> entre 2005 e 2022.....	88
Figura 22. Comportamento das variáveis de precipitação por <i>buffer</i> entre 2005 e 2022 Valores Máximos (MAX); Média; valores médios das variáveis: número de dias de chuva (Media_NDC); número de dias de chuva efetiva (Media_NDCE); número de dias consecutivos sem chuva (Media_NDCSC) e número consecutivo sem chuva efetiva (Media_NDCSCE) e Valores Mínimos (MIN)	91
Figura 23. <i>Clusters</i> baseados nas variáveis de precipitação.....	93
Figura 24. Espacialização dos <i>clusters</i> de precipitação.....	95
Figura 25. Médias do IVDN entre 1994 e 2022	96
Figura 26. Maiores médias de vegetação. A. <i>buffer</i> ID7 período seco; B. ID38 período chuvoso; C. ID36 período seco.....	97
Figura 27. Área queimada no ID36	98

Figura 28. Comportamento das variáveis do IVDN: Amplitude, Valores Máximos (MAX), Média, Valores Mínimos (MIN) e Desvio Padrão (STD) entre 1994 e 2022 ..	99
Figura 29. Menores médias do IVDN. A. ID 32, período seco; B. ID15, período seco; ID25, período seco.....	101
Figura 30. Maiores amplitudes do IVDN. A. ID12, período seco; B. ID8, período seco; C. ID40, período seco	102
Figura 31. <i>Clusters</i> baseados nas variáveis do IVDN	103
Figura 32. Espacialização dos <i>clusters</i> das variáveis do IVDN	105
Figura 33. Melhores correlações entre os acumulados de chuva e o IVDN.....	106
Figura 34. Melhores Correlações entre IVDN e acumulados de precipitação para 30, 60,90 e 120 dias antes do imageamento	108
Figura 35. Clusters baseados nas variáveis geológico-geomorfológicas, de IVDN e de Precipitação	109
Figura 36. Espacialização dos <i>clusters</i> baseados nas características geológico-geomorfológicas, de IVDN e precipitação	112
Figura 37. A. Regressões para as variáveis geológico-geomorfológicas. B. Regressões para as variáveis de Precipitação (em vermelho os maiores valores).....	114
Figura 38.A. Regressões para as variáveis do IVDN. B. Regressões para todas as variáveis (em vermelho os maiores valores)	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantificação dos Índices de Vegetação (IVs) na literatura internacional e nacional.....	36
Tabela 2. Localização dos Postos pluviométricos	50
Tabela 3. Datas e Satélite/Sensor das imagens utilizadas	62
Tabela 4. Classes do Índice de Precipitação Padronizado (SPI)	65
Tabela 5. Classificação da correlação de Pearson	69
Tabela 6. Características dos Pontos escolhidos	72
Tabela 7. Características geológico-geomorfológicas dos <i>buffers</i>	82
Tabela 8. <i>Clusters</i> das variáveis geológico-geomorfológicas	86
Tabela 9. Contagem dos anos classificados por buffer	89
Tabela 10. Valores Médios, Máximos e Mínimos da precipitação anual e valores médios das variáveis: número de dias de chuva (NDC); número de dias de chuva efetiva (NDCE); número de dias consecutivos sem chuva (NDCSC) e número consecutivo sem chuva efetiva (NDCSCE)	91
Tabela 11. Clusters das variáveis de precipitação. Valores Médios, Máximos e Mínimos da precipitação anual e valores médios das variáveis: número de dias de chuva (NDC); número de dias de chuva efetiva (NDCE); número de dias consecutivos sem chuva (NDCSC) e número consecutivo sem chuva efetiva (NDCSCE).....	94
Tabela 12. Média, amplitude, máximo, mínimo e desvio padrão do IVDN (1994-2022)	100
Tabela 13. <i>Clusters</i> das variáveis do IVDN	104
Tabela 14. Correlações entre o acumulado de chuva e o IVDN. Em vermelho valores acima de 0.6.....	107
Tabela 15. Clusters das variáveis geológico-geomorfológicas, de IVDN e Precipitação	111
Tabela 16. Coeficientes de determinação (R^2) por <i>clusterização (em azul os maiores valores)</i>	113

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo do Índice de Umidade Topográfico – ITU	61
Equação 2: Cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – IVDN...	63
Equação 3: Função de densidade de probabilidade gama incompleta	65
Equação 4: Função Gama	65
Equação 5: Estimativa para os valores de α	66
Equação 6: Estimativa para os valores de β	66
Equação 7: Método de Máxima Verossimilhança	66
Equação 8: Probabilidade acumulada	66
Equação 9 e 10: Equações do Índice de Precipitação Padronizado – SPI	66
Equação 11: Correlação de <i>Pearson</i>	69
Equação 12: Regressão Linear Simples	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA: Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba
ATS: Anomalias de Temperatura da Superfície
CCM's: Complexos Convectivos
CPRM: Serviço Geológico do Brasil
DBSCAN: Spatial clustering based on application density with noise
DOLs: Distúrbios Ondulatórios de Leste
ETM+: *Enhanced Thematic Mapper*
EVI: *Enhanced Vegetation Index*
FAO: *Food and Agriculture Organization*
FTSS: Florestas Tropicais Sazonalmente Secas
GLMs: Modelos Lineares Gerais
IAF: Índice de Área Foliar
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ITU: Índice Topográfico de Umidade
IV: Índice de Vegetação
IVAS: Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo
IVDN: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
LAI: *Leaf area index*
MDE: Modelo Digital de Elevação
MIVAS: Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo Ajustado
MVC: Método de Composição de Valor Máximo
NDC: Número de dias de Chuva
NDCE: Número de dias de Chuva Efetiva
NDCSC: Número consecutivos de dias sem Chuva
NDCSCE: Número consecutivos de dias sem Chuva Efetiva
NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*
NDWI: *Normalized Difference Water Index*
NE: Nordeste
OLI: *Operational Land Image*
PB: Paraíba
PESAS: Parque Estadual Serras das Águas Sertanejas
SAB: Semiárido brasileiro
SAVI: *Soil Adjusted Vegetation Index*
SPI: *Standardized Precipitation Index*
SR: Sensoriamento Remoto
SRTM: Missão Topográfica Radar Shuttle
TM: *Thematic Mapper*
TSM: Temperatura da Superfície do Mar
USGS: *United States Geological Survey*
UV: Ultravioleta
VCAN: Vórticos ciclônicos de altos níveis
ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT: Zona de Convergência Intertropical
ZCPS: Zona de Convergência do Pacífico Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

\ln : logaritmo neperiano

$\tan\beta$: Declividade do terreno (radiano)

α : área acumulada (m^2)

ρ_{IV} : fluxo radiante reflexivo no infravermelho próximo

ρ_V : fluxo radiante reflexivo no vermelho

α : Parâmetro sobre forma da função gama

n : Número de séries de precipitação.

β : Parâmetro sobre escala da função gama

ε : representa os resíduos ou erros do modelo de regressão

INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas tropicais se caracterizam pela sazonalidade das chuvas que alternam entre períodos secos e chuvosos, desse modo, a vegetação existente nessas áreas desenvolveu adaptações que se ajustam a esse período sazonal (REICH & BORCHERT, 1984; VICO, *et al.*, 2015; SOUZA, 2016). O regime hidrológico é complexo e com fortes gradientes de sazonalidade, além de uma variabilidade interanual muito acentuada, que irá promover anos muito úmidos e períodos de secas extremas.

A sazonalidade climática, especialmente da precipitação, influencia a sazonalidade da vegetação, fazendo com que, o ciclo de crescimento anual da vegetação tenha relação direta com a precipitação. Assim, a variabilidade climática intra-anual gera variabilidade nos ciclos de crescimento da vegetação, proporcionando a existência de ciclos com maior ou menor absorção e fixação de carbono atmosférico, o qual influencia no clima regional (BECERRA, CARVALHO e OMETTO, 2015). Por esse motivo, as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas - FTSS, apresentam claramente uma relação com a sazonalidade climática que refletirá em suas fitofisionomias.

Ressalta-se que a vegetação pode ser entendida como o elemento do meio físico mais sensível a sofrer modificações, naturais e principalmente antrópicas. As florestas secas tropicais têm a terceira maior taxa de desmatamento do mundo e estão sujeitas a altas alterações antropogênicas, tais modificações terão influência direta sobre escoamento superficial, assim a modificação da distribuição e dos padrões da vegetação podem ser compreendidos como uma variável de mudanças para a dinâmica superficial. Logo, ao analisar as modificações dos padrões e distribuição intra-anual da vegetação no semiárido, devido à perda e ganho de folhas em determinados momentos do ano, é possível ter indicações da variação da dinâmica superficial (KASAI, *et al.*, 2005; SOUZA, 2011; STAN e SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2019).

As florestas tropicais sazonalmente secas, apresentam um padrão típico do ciclo fenológico anual, com valores influenciados pelo ciclo de chuvas e que são delimitados pelos parâmetros fenológicos de início e fim da estação chuvosa. Desse modo, o monitoramento de vegetação sazonal a partir dos índices de vegetação (IV) e do Sensoriamento Remoto (SR), deve levar em consideração a necessidade de fazer uma avaliação nos períodos úmidos e secos, a fim de avaliar a amplitude do comportamento das florestas sazonais. É de suma importância a efetuação desse tipo de análise, devido a relação que a vegetação tem com os períodos de maior ou menor incidência de

precipitação, mas principalmente pelo fato de haver uma variabilidade interanual na vegetação, fazendo com que seja imprescindível a análise da sua sazonalidade (ARAÚJO, SOUZA e MACHADO, 2019; GERARD *et al.*, 2020; PASSEL, KEERSMAECKER e SOMERS, 2020).

A latitude também influenciará no tempo, duração e frequência da sazonalidade, desse modo, os períodos secos mais curtos e menos severos poderão ser encontrados em áreas próximas do equador, já nas áreas próximas aos trópicos, pode haver apenas uma estação seca, porém sua duração pode chegar até 8 meses. As correntes oceânicas quentes ou frias, a exposição a monções ou movimentos de massa de ar e as barreiras orográficas também podem influenciar na sazonalidade da vegetação (FENG, 2013; BRONWEN *et al.*, 2014; CHADWICK *et al.*, 2016; STAN e SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2019; MARCHESINI *et al.*, 2020; CHEN, WANG e FU, 2020).

Embora seja primordial o entendimento da interação entre a precipitação e a vegetação nas áreas semiáridas, outros elementos também podem influenciar em seu comportamento, como a geologia, os tipos de solos, variáveis geomorfológicas como altitude e declividade, podem apresentar relação com esses arranjos vegetacionais. Mas ainda é incipiente a construção teórica sobre tal dinâmica (STAN e SÁNCHEZ-AZOFEIFA 2019), visto que, geralmente, se trabalha com um contexto teórico metodológico construído em ambientes semiáridos com arranjo vegetacional muito distinto do encontrado no Brasil ou a relação entre a vegetação e a precipitação é analisada a partir de outras perspectivas e de forma separada dos demais elementos da paisagem (VERDUZCO, *et al.*, 2015; RITO *et al.*, 2017).

Desse modo, o estudo da correlação entre dinâmica da vegetação de Caatinga e a precipitação, levando em consideração suas características geológico-geomorfológicas e seu grau de conservação é de suma importância, pois permitirá a identificação do período de maior influência da precipitação na alteração da vegetação em seus variados contextos ambientais, o que proporcionará uma melhor compreensão do comportamento dessa, bem como, possivelmente, a obtenção de um padrão de previsibilidade relacionado ao acúmulo de dias de chuva e da reposta da cobertura vegetal, sendo essa, uma das inquietações desta pesquisa.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Analisar o comportamento intra-anual dos arranjos de vegetação de Caatinga em diferentes contextos geológico-geomorfológicos do Alto Sertão da Paraíba, a partir da sua correlação com os dados pluviométricos.

Objetivos Específicos

- Identificar vários arranjos de vegetação nativa de Caatinga de áreas conservadas e degradadas, nos diferentes contextos geológico-geomorfológicos;
- Analisar o comportamento da densidade da vegetação durante 28 anos;
- Coletar e analisar os dados de precipitação dos postos pluviométricos da área durante 28 anos, levando em consideração anos secos, chuvosos e habituais;
- Entender a relação entre as mudanças na vegetação e a precipitação;
- Criar um padrão de previsibilidade para a vegetação de Caatinga a partir da correlação entre a vegetação e a precipitação, levando em consideração os contextos geológico-geomorfológicos.

HIPÓTESE

A vegetação de Caatinga, devido à sua adaptação ao clima semiárido, é sensível à irregularidade das precipitações na região. No entanto, essa sensibilidade pode variar em áreas de diferentes formações geológicas, como as de geologia cristalina e sedimentar e de diferentes tipos de solos, especialmente quando comparadas em ambientes preservados e degradados. Considera-se que, em áreas preservadas e onde há uma maior capacidade de retenção de umidade no solo, a vegetação possa apresentar uma resposta mais resiliente às variações de precipitação. Por outro lado, em áreas degradadas e/ou com menor capacidade de retenção de água no solo, a vegetação pode ser mais suscetível às mudanças na precipitação, devido à umidade no solo e à interferência humana mais intensa, que pode agravar os efeitos da seca e da desertificação. Portanto, estima-se que possa ser possível prever a resposta da vegetação em relação às variações de precipitação. Essa hipótese sugere a importância de considerar não apenas a precipitação, mas também as características geológicas e o estado de preservação do ambiente ao analisar o comportamento da vegetação de Caatinga em resposta às condições climáticas.

CAPÍTULO I



44

FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

1.1. Ambientes Tropicais Semiáridos

As áreas tropicais estão entre as latitudes 23° 27' Norte e Sul, porém as análises dos seus fatores ambientais vão além dessa classificação, são áreas de diferentes tipos climáticos, que terão temperatura e precipitação variáveis, o que acarretará diferentes biomas (VIRMANI, SIVAKUMAR e REDDY, 1980). As definições científicas do que são as terras áridas e semiáridas são baseadas em diversos critérios e envolvem processos de erosão, padrão de drenagem, relação entre parâmetros climáticos, o crescimento e os tipos de vegetação. É a indisponibilidade de água, que dificulta ou impede o crescimento e o desenvolvimento da flora, que caracteriza uma região árida ou semiárida e todos os esquemas para a classificação dessas áreas envolvem a identificação da disponibilidade de umidade, através da relação entre precipitação e evapotranspiração (GAUR e SQUIRES, 2017).

As regiões semiáridas tropicais são caracterizadas pela sazonalidade das chuvas que alternam entre períodos secos e chuvosos. Elas recobrem cerca de 17,7% da superfície terrestre, a vegetação existente nessas áreas desenvolveu adaptações que se ajustam a esse período sazonal (REICH e BORCHERT, 1984; VICO, *et al.*, 2015; SOUZA, 2016). O regime hidrológico é muito complexo e com fortes gradientes de sazonalidade, além de uma variabilidade interanual muito acentuada, o que produz anos muito úmidos e períodos extremos de secas (MONTENEGRO e RAGAB, 2012; SOUZA, 2016).

A durabilidade desses períodos secos é altamente variável, perdurando normalmente entre quatro e seis meses, assim também se caracteriza o regime de precipitação interanual, que pode variar entre 500 e 1800mm, com áreas particulares que apresentam em torno de 300mm. Essa precipitação é concentrada, principalmente nos meses do verão, resultado da reversão dos padrões de fluxo dos ventos, devido ao aumento da temperatura do continente em relação à temperatura da superfície do mar. A temperatura média anual dessas áreas apresenta uma variação entre 18 e 26 °C, não sendo encontradas temperaturas abaixo de zero (PÉREZ-GARCÍA; MEAVE e CEVALLOS-FERRIZ, 2012; CORRÊA *et al.*, 2019).

O fato de o volume de precipitação ser inferior ao de evapotranspiração atribui a essas áreas uma característica de déficit hídrico, restringindo a disponibilidade local da água, o que difere das áreas úmidas que apresentam disponibilidade natural contínua. Tais condições desfavorecem o escoamento, principalmente quando o desvio padrão anual das chuvas é muito alto, fator que dificulta o armazenamento e a infiltração de água

(MATALLO JUNIOR, 2003; MONTENEGRO e MONTENEGRO, 2012; FRIES, SILVA, OÑATE-VALDIVIESO e OCHOA-CUEVA, 2020). A partir dessas duas variáveis (precipitação e evapotranspiração) é possível identificar o índice de aridez de uma determinada área (ARAÚJO, 2012).

Os climas semiáridos tropicais são regulados pelos sistemas específicos em cada região, que desempenham um papel importante na determinação da distribuição dos climas áridos e semiáridos. Em regiões semiáridas da África Oriental, a circulação é liderada pelos sistemas anuais de monções de característica estável e seco. Sua variação vai de Nordeste para Sudeste, enquanto a circulação superior é controlada pelo ar anticiclônico também estável que segue do Saara até a Arábia. Na América do Sul, nas áreas da costa atlântica da Venezuela e da Colômbia, as condições de seca semelhantes às de outras áreas semiáridas, se desenvolvem devido a divergência do fluxo de ar que ocorre em resposta aos ventos alísios de Nordeste (NE), esses sopram quase paralelamente à costa (CORRÊA *et al.*, 2019).

No caso do Semiárido brasileiro (SAB), o principal sistema regulador do clima é a Zona de Convergência intertropical – ZCIT, formada pela confluência entre os ventos alísios de Nordeste e os alísios de Sudeste, que formam as nuvens convectivas responsáveis pelas chuvas intensas e irregulares. Além da ZCIT, atuam também a Zona de Convergência Pacífico Sul (ZCPS) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (LIU, MASSAMBANI e NOBRE, 1994).

Porém, a zona semiárida do Nordeste brasileiro não se distingue somente por sua localização em baixas latitudes tropicais, mas também por seu deslocamento em direção ao interior do continente, que encontra uma barreira orográfica, servindo como um divisor, na qual os climas úmidos se localizam a Leste no litoral, e a oeste na transição para a Amazônia (CORRÊA *et al.*, 2019).

1.2. Florestas Secas e Sazonalidade Climática

A sazonalidade climática, especialmente da precipitação, influencia a sazonalidade da vegetação, ou seja, o ciclo de crescimento anual da vegetação tem relação direta com a precipitação. Assim, a variabilidade climática interanual deve propiciar variabilidade nos ciclos de crescimento da vegetação, mostrando ciclos de crescimento com maior ou menor produtividade primária ou que significa ciclos com maior ou menor absorção e fixação de carbono atmosférico, o qual influencia no clima regional (BECERRA,

CARVALHO e OMETTO, 2015). Desse modo, em especial as florestas tropicais sazonalmente secas, apresentam claramente uma relação com a sazonalidade climática e refletem em suas fitofisionomias tal relação.

Existem vários estudos, remotos e atuais, relacionados a florestas tropicais sazonalmente secas, assim como, uma variação entre a sua nomenclatura. Ao entrar em contato com essas pesquisas, é possível identificar que elas designam essas florestas como: florestas secas tropicais, florestas tropicais sazonalmente secas, florestas secas neotropicais, ou simplesmente florestas secas, e geralmente todas essas são definidas com as mesmas características. Por exemplo, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (Food and Agriculture Organization – FAO) define as florestas tropicais secas como sendo aquelas que estão sob influência do clima tropical, com chuvas de verão, um período seco de 5 a 8 meses e uma precipitação que varia entre 50 e 1500mm (BLACKKE, 2014). Complementando tal definição, Swaine (1992) acrescenta que o termo “seco” diz respeito as condições limitantes da umidade para o crescimento das árvores, mostrando que a distribuição dessas florestas irá estar totalmente relacionada ao equilíbrio entre a precipitação e a evapotranspiração, além disso é excluída dessa classificação a vegetação de savana.

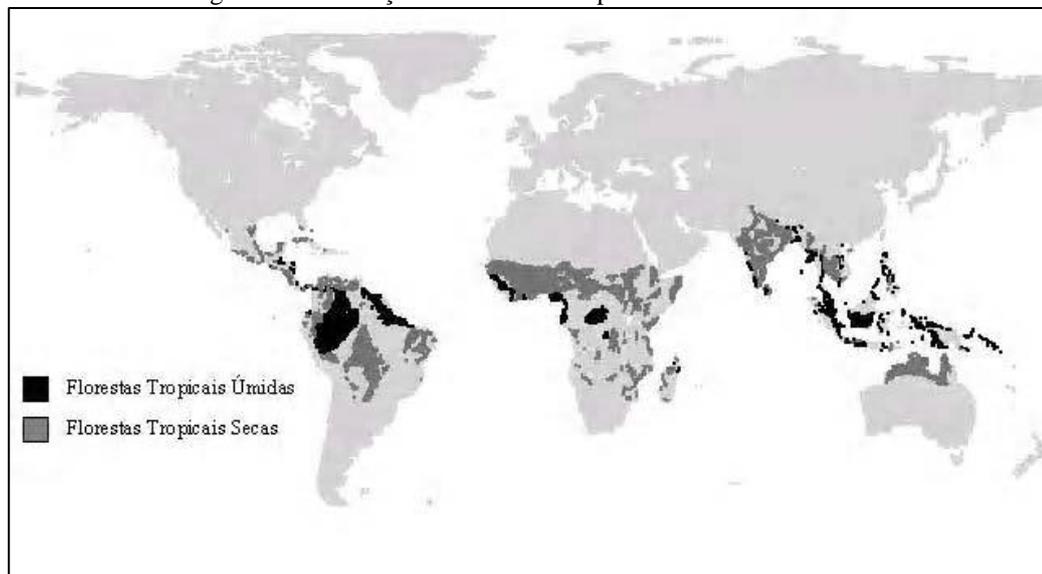
Ao tratar dos ecossistemas secos neotropicais, Lima *et al.* (2018) utilizam o termo florestas tropicais sazonalmente secas. Segundo os autores essa vegetação apresentará uma estrutura menor e uma área basal mais baixa do que as florestas tropicais e com espécies espinhosas mais frequentes e é a sazonalidade que irá interferir no crescimento, no processo de floração e na produção de serapilheira. A Dryflor (2016) utiliza a nomenclatura florestas secas neotropicais como sinônimo das florestas secas, e as descreve com as mesmas características das demais, diferenciando-as das savanas por apresentarem um dossel mais fechado, localizadas em áreas com precipitação inferior a 1800mm por ano e que apresentam sazonalidade e uma vegetação caducifólia. Sendo a especificação neotropical direcionada para caracterização fitossociológica (BANDA *et al.*, 2016).

Claramente, é possível identificar que independente do nome que recebe, essas áreas são influenciadas pelo clima e sofrem com a sazonalidade, precisando se adaptar a relação entre precipitação e evapotranspiração, que culmina em uma baixa umidade na maior parte do ano. Portanto, adotaremos a nomenclatura Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS), visto que já aborda a relação com o clima e a sazonalidade,

sabendo que a área alvo desta pesquisa encontra-se localizada na região tropical, mais precisamente nos neotrópicos.

Em geral, as florestas tropicais sazonalmente secas são caracterizadas por seu dossel fechado, o que as distingue das savanas. Ocorrem nas regiões dos trópicos, onde os solos são considerados férteis e a precipitação é inferior a 1800mm, com uma estação seca que pode variar entre cinco e seis meses. São áreas que sofrem secas sazonais e como forma de adaptação são caracterizadas como vegetação predominantemente decídua. Essas áreas correspondem a 40% das florestas tropicais do mundo e estão distribuídas nas Américas Central e do Sul, África, Ásia e Oceania (Figura 1), das quais 50% estão situadas na América Latina e estão atualmente com menos de 10% de sua extensão original (ESPÍRITO-SANTO *et al.*, 2006; JARAMILLO *et al.*, 2003; BANDA *et al.*, 2016; POWER *et al.*, 2016).

Figura 1. Localização das florestas tropicais no mundo



Fonte: Espírito-Santo (2006)

Essas áreas têm uma longa história com a interação humana, a exemplo, têm-se as áreas localizadas no México e no Peru que abrigavam civilizações pré-colombianas. Nessa época, o tipo de clima e os solos férteis atraíram maiores densidades populacionais, gerando um aumento por energia e terras, como consequência houve o aumento da degradação. Atualmente o que tem acelerado a destruição das florestas secas é a intensificação dos cultivos e o aumento das áreas de pastagens. Aliado ao problema de supressão da vegetação, está a pouca proteção para as áreas remanescentes (BANDA *et al.*, 2016; SFAIR *et al.*, 2018).

Além da ação humana, essas áreas são afetadas pela própria dinâmica natural, como a incidência da sazonalidade e em algumas áreas até mesmo a ocorrência de

incêndios. Há uma relação inquestionável entre os ecossistemas terrestres e a variabilidade climática. A vegetação como um dos componentes principais dos ecossistemas, também irá apresentar uma interação com o clima, tanto com relação ao seu crescimento, quanto a sua densidade, e aliados, esses dois fatores controlam a dinâmica da vegetação. A relação entre o clima e as florestas sazonalmente secas se configura como ainda mais complexa, especialmente por levar em consideração a sazonalidade. Estudos apontam que as florestas secas são resistentes aos déficits hídricos sazonais, de maneira que perdem as folhas, e assim limitam sua transpiração durante a estação seca, como forma de adaptação e sobrevivência a esses ambientes (JARAMILLO *et al.*, 2003; ROERINK *et al.*, 2003; SUN *et al.*, 2015; SIYUM, 2020).

De acordo com Gaur e Squires (2017), o clima das florestas tropicais sazonalmente secas é definido de acordo com as médias das condições anuais de temperatura e precipitação, porém o fator diferencial é que são sazonais em relação às chuvas, elemento importante para a estruturação e função do ecossistema como um todo, principalmente quando os padrões de atividade biológica são influenciados pela disponibilidade de água, que embora não altere a diversidade e a uniformidade das espécies, afeta nos regimes de floração. Assim, o tempo de floração e os estágios sucessionais estarão relacionados com o início da estação chuvosa, refletindo em indivíduos com valores baixos na estatura e área basal, maior abertura de dossel e menor diversidade de espécies em relação às florestas úmidas, fazendo com que a disponibilidade de água e a biomassa estejam positivamente correlacionadas (STAN e SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2019).

Para as florestas tropicais sazonalmente secas, o tempo, a frequência e a duração da sazonalidade irão depender em parte da sua latitude, assim, os períodos secos mais curtos e menos severos poderão ser encontrados em áreas próximas do equador, e à medida que há o distanciamento do Equador, esse período seco vai se tornando mais proeminente. Nas áreas próximas aos trópicos, pode haver apenas uma estação seca, porém sua duração pode chegar até 8 meses. Evidentemente que há as particularidades e a interferência de outros fatores que terão influência na determinação da sazonalidade, como proximidade de correntes oceânicas quentes ou frias, a exposição a monções ou movimentos de massa de ar e as barreiras orográficas (FENG e FU, 2013; CHADWICK *et al.*, 2016; MARCHESINI *et al.*, 2020).

A sazonalidade da vegetação dependerá de uma variedade de atributos, como características topográficas, os tipos de arranjos vegetais, propriedades do solo, ou até

mesmo a combinação desses fatores. Contudo, o padrão de precipitação é um fator primordial para o entendimento das florestas tropicais sazonalmente secas e tem influência nessa vegetação desde o final do último período glacial, especialmente as que estão na região neotropical, pois os estágios sucessionais e o regime de floração são afetados pela disponibilidade de água. Embora a distribuição de espécies não esteja correlacionada com a precipitação, a dinâmica da biomassa está correlacionada positivamente com essa variável (WHITNEY *et al.*, 2014; STAN e SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2019; CHEN, WANG e FU, 2020).

A influência da precipitação na resposta dinâmica da vegetação em áreas secas, requer uma atenção maior na análise. Ao monitorarem a vegetação em Israel, Drori *et al.* (2020) observaram o comportamento de áreas que variavam desde vegetação subúmida seca até semiárida e árida, analisando a biomassa da vegetação e relacionando com um limiar dinâmico sensível à precipitação. Essa é uma metodologia que terá uma relação com o nível precipitação e a biomassa da vegetação, relacionando a quantidade de cada um e propondo que a partir do comportamento da chuva, os limiares sejam dinâmicos.

As Regiões Neotropicais apresentam áreas de vegetação que estão intimamente ligadas e influenciadas pela sazonalidade climática, especialmente pela precipitação. Essa região apresenta características de identidade geológica composta por uma história antiga, de ter uma biota única e endêmica, uma diversidade de ambientes, climas e topografia complexa que culminam na existência de múltiplos biomas e ecorregiões, sendo classificada como uma das regiões mais biodiversas do mundo, abrangendo desde as áreas de florestas úmidas até as de florestas sazonalmente secas (LIMA *et al.*, 2018) NARVÁEZ-GÓMEZ *et al.*, 2018).

Os Neotrópicos estão distribuídos nas placas tectônicas da América do Norte, Caribe e América do Sul, apresentando características geológicas distintas. As placas sul-americana e africana, por exemplo, faziam parte, no passado, do paleocontinente da Gondwana, fator esse, que aliado com as mudanças climáticas do pleistoceno, podem ser uma possível força que também influenciou a distribuição geral das Florestas Secas Neotropicais (ANTONELLI e SANMARTÍN, 2011; LINARES-PALOMINO, OLIVEIRA-FILHO e PENNINGTON, 2011).

Atualmente a distribuição dessas florestas secas neotropicais vai desde o centro do México até a Argentina (Figura 2) e apresentam maior riqueza de espécies no México, mas existem outras áreas com níveis similares de diversidade e que podem ser encontrados em outros lugares, como Peru e Bolívia (PENNINGTON, LEWIS e

RATTER, 2006; FERNANDES e QUEIROZ, 2018; LIMA *et al.*, 2018; ANDRADE *et al.*, 2020). Embora alguns estudos incluam também o cerrado nessa classificação de florestas secas, outros apresentam essa vegetação como savanas que estão localizada nessa região (BANDA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018).

Figura 2. Distribuição das Florestas e arbustais tropicais sazonalmente secas na região neotropical



Fonte: Fernandes e Queiroz (2018)

As florestas secas neotropicais são caracterizadas por árvores com um dossel (contínuo ou quase contínuo) e uma área basal mais baixos do que florestas tropicais úmidas, além de apresentarem espécies espinhosas e suculentas com maior frequência, especialmente nas formações mais secas, enquanto as gramíneas quase não se fazem presentes, o que as diferencia de outros biomas neotropicais, como por exemplo, as florestas tropicais de planícies e as savanas (MURPHY e LUGO, 1986; PRADO, 1993; PENNINGTON, LEWIS e RATTER, 2006; LIMA *et al.*, 2018).

Assim, se faz necessário distinguir os biomas neotropicais, sob diferentes aspectos. Do ponto de vista ecológico, a diferença entre eles é a variação do clima. O clima das florestas tropicais de planícies é úmido, o das florestas secas neotropicais é um clima seco, com uma sazonalidade marcante e o clima das savanas se caracteriza como

semelhante ou ligeiramente mais úmido do que o das florestas secas (PENNINGTON, LEWIS e RATTER, 2006; RATTER, BRIDGEWATER e RIBEIRO, 2019).

Com relação aos fatores edáficos, as florestas tropicais úmidas apresentam uma variedade de solos e regimes de inundação sazonal; as florestas secas se desenvolvem em áreas de solos ricos em nutrientes e pH relativamente altos; já as savanas são encontradas em solos ácidos e distróficos (STOTT *et al.*, 1994; WHITMORE, 1997; PENNINGTON, LEWIS e RATTER, 2006).

Outro aspecto que difere esses biomas é o regime de fogo, esse não tem sido um fator ecológico importante na floresta tropical nem na FTSS, mas para a savana a abundância de gramíneas as torna mais inflamáveis na estação seca, fazendo com que as espécies se adaptem a esse fator, trazendo em si casca espessa e cortiça; uma capacidade de brotar de rizomas substanciais; e botões protegidos (PENNINGTON, LEWIS e RATTER, 2006; PENNINGTON, LAVIN e OLIVEIRA-FILHO, 2009).

É comum as florestas tropicais das regiões neotropicais, África e Ásia, serem consideradas como o mesmo bioma, embora apresentem diferenças na sua composição florística. Porém, faz-se necessário refletir sob fatores como: a floresta seca neotropical apresenta uma fisionomia mais variável que as demais florestas tropicais, a qual pode variar de baixo matagal até altas florestas; geralmente, existem em pequenos fragmentos, devido à ação antrópica, e essa fragmentação não atrai a atenção por parte de estudiosos, em comparação a florestas tropicais mais preservadas; e ainda possui variadas nomenclaturas, a exemplo, “floresta de monções” na Ásia, e até dentro da própria região neotropical, como a Caatinga no Brasil, o “cuabal” em Cuba e o “bosque tropical caducifólio” no México (PENNINGTON, LEWIS e RATTER, 2006).

1.3. Caatinga: Floresta Tropical Sazonalmente Seca

A Caatinga ocorre no semiárido brasileiro, abrangendo os estados do Nordeste e o norte de Minas Gerais. É conhecida por ser uma vegetação fortemente sazonal, que apresenta sua forma exuberante na estação chuvosa, período em que ocorre sua floração, enquanto na estação seca exibe o contraste com a perda de suas folhas em forma de adaptação ao clima semiárido, que apresenta precipitação média anual de 800mm, temperaturas médias anuais e evapotranspiração elevadas. Suas espécies são constituídas principalmente por árvores pequenas e arbustos, geralmente de folhas pequenas, suculentas e cactáceas (FERNANDES e QUEIROZ, 2018).

Contemporaneamente, a Caatinga é classificada como Floresta Tropical Sazonalmente Seca e se enquadra entre as florestas tropicais mais ameaçadas do mundo. Embora já tenha sido classificada como vegetação de savana, essa se caracteriza por ter um dossel fechado, diferenciando-se de uma savana mais aberta e rica em gramíneas (VELOSO, RANGEL FILHO e LIMA, 1991; BANDA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018). Apresenta diversas características morfo-anatômicas e fisiológicas distintivas em resposta, principalmente, ao regime intermitente e reduzido da precipitação, bem como, ao tipo de solo e topografia. Embora possua uma diversidade biológica significativa, se comparada a outras áreas semiáridas do planeta, ocorre em uma região que sofre expressivamente com a interferência antrópica. Estima-se que cerca de 89% da sua formação original já foi desmatada e as áreas que ainda restam estão em contínuo processo de fragmentação (CASTELLETTI *et al.*, 2004; MALVEZZI, 2007; SANTOS *et al.*, 2007; MMA, 2010; LOIOLA *et al.*, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2023).

Esse tipo de vegetação é caracterizado por suportar um longo período de estação seca. Suas espécies podem variar, desde perenifólias até decíduas ou caducifólias, podendo perder entre 50 e 100% de sua folhagem. A variação no grau de deciduidade será de acordo com a reação aos déficits hídricos, ou seja, a medida que as chuvas diminuem essa caducidade aumenta, e o tempo preciso da queda das folhas depende da quantidade total e da distribuição da chuva em um determinado ano, desse modo, algumas espécies irão perder as folhas imediatamente após a estação chuvosa e outras irão se manter até o final da estação seca. Algumas espécies decíduas perdem as folhas no final da estação chuvosa e assim permanecerão entre quatro e seis meses, outras apresentam perda ao final da estação seca, dessa maneira, permanecem sem folhas de dois a três meses, ou seja, por um intervalo mais curto (BEZAURY-CREEL, 2009; MARTÍNEZ e GALINDO-LEAL, 2017).

Essa queda das folhas é essencial para evitar a perda excessiva de água, pois com a diminuição da turgescência, as raízes vão em busca de água nas camadas mais profundas do solo, por esse motivo, haverá um acúmulo da biomassa na raiz, em detrimento da parte aérea (PIMENTEL, 2004; SOUZA *et al.*, 2010; LIMA e ALMEIDA, 2017). Esse fator está combinado a outras formas de adaptação, como a cor mais clara da casca para diminuir o aquecimento do tecido vivo da planta, a cor verde do caule para contribuir com a fotossíntese sem aumentar a superfície da planta, colaborando com a eficiência vital e o armazenamento de água seja no caule, ou nas raízes, a exemplo das *cactáceas* e do *umbuzeiro* (VELOSO, RANGEL FILHO e LIMA, 1991).

As espécies decíduas da Caatinga apresentam uma relação entre a floração e a sazonalidade, apontando que de 50 e 80% da floração e da regeneração da folhagem ocorre na estação chuvosa, ou na transição entre o período seco-chuvoso. Nas áreas secas do México, os picos de floração ocorrem principalmente no período chuvoso, nas florestas secas em Gana, cerca de 78% das espécies também apresentam a sua floração na estação chuvosa. Desse modo, é possível constatar que nas áreas de florestas sazonalmente secas, essa floração ocorre principalmente após as primeiras chuvas ou na transição do período seco para o chuvoso (VALDEZ-HERNÁNDEZ, 2015; RUFINO *et al.*, 2020).

A produção de serapilheira é um fator que corrobora a afirmação acima, pois a ocorrência da maior produção dessa acontece no período seco e cerca de 60% da sua composição é constituída por folhas, um mecanismo decorrente principalmente da redução da precipitação. A manta de serapilheira que recobre o solo em boa parte do ano é de grande importância para diminuir a evaporação da água do solo e possibilitar o armazenamento de água por um período mais longo na estação seca (LIMA *et al.*, 2015; ARAÚJO *et al.*, 2020).

O comportamento da vegetação de Caatinga está voltado para a perda de folhas principalmente pelo déficit de água, assim como, em outras áreas de florestas secas tropicais, como no leste africano, uma das poucas áreas no globo que irá apresentar um clima semiárido tropical, com características bem semelhantes às do Nordeste brasileiro e que difere do encontrado em outras áreas semiáridas não tropicais, onde a vegetação perde as folhas pela variação/diminuição na temperatura (PASSEL, KEERSMAECKER e SOMERS, 2020).

É a adaptação da flora da Caatinga às condições locais do clima, da geologia e dos solos que vai permitir uma heterogeneidade florística. As diferenças nos terrenos geológicos e nos tipos de solos serão primordiais para a explicação da existência da heterogeneidade ecológica e florística. Um dos estudos pioneiros que reconhece a diversidade dessa vegetação e propõe uma classificação é o de Andrade-Lima (1981). O autor utilizou aspectos fisionômicos e dados florísticos para caracterizar seis unidades de Caatinga. Ele destaca a importância da precipitação e do solo como influenciadores da diversidade da vegetação.

Anos depois, Prado (2003) utiliza a denominação “Caatingas” para demonstrar a diversidade da vegetação, baseado na mesma linha do estudo de Andrade e Lima (1981),

dividindo-as em caatingas do sertão e caatingas do agreste, sendo o clima o principal elemento da divisão, embora também aponte a questão da geologia.

Diversos estudos sobre padrões de diversidade, distribuição e endemismo têm demonstrado que provavelmente existam duas biotas historicamente distintas e que podem ser subdivididas, enquanto uma estará associada as superfícies sedimentares arenosas, a outra se desenvolve em áreas compostas por solos derivados de rochas cristalinas do pré-cambriano (QUEIROZ 2006; CARDOSO e QUEIROZ 2007; ARAÚJO *et al.* 2011; COSTA *et al.*, 2015; QUEIROZ, 2019; BATISTA *et al.*, 2020; SERAFIM-FILHO *et al.*, 2021).

Uma das classificações mais recentes traz a existência de três grupos principais de biotas: a Caatinga do Cristalino, a Caatinga sedimentar e um terceiro grupo florístico composto pela Caatinga Arbórea, situada principalmente no norte de Minas Gerais e centro-sul da Bahia, assim como na borda oriental da Chapada Diamantina (FERNANDES e QUEIROZ, 2019).

A Caatinga do Cristalino ocupa aproximadamente 70% do Semiárido e está associada a solos com fertilidade moderada ou elevada da Depressão Sertaneja, unidade de relevo que é considerada a paisagem típica do semiárido. Apresenta uma superfície de pediplanação e um relevo predominantemente suave ondulado, além de ser cortada por vales estreitos com vertentes dissecadas. Essa paisagem apresenta ainda elevações residuais e cristas, que podem ser explicadas pelos ciclos intensos de erosão que atingiram grande parte do Sertão nordestino no passado. É a flora do Cristalino que possui uma maior semelhança com as outras áreas de florestas tropicais sazonalmente secas das Américas. Cerca de 60% de suas espécies são de plantas não-lenhosas, principalmente as chamadas ervas anuais. É importante frisar que a fertilidade do solo é explorada para a agricultura, isso faz com que grandes áreas da vegetação de Caatinga sejam devastadas ou substituídas por agricultura e pastagem, estando a vegetação original em predominância nos topos das serras, áreas de difícil acesso (SÁ *et al.*, 2004; ARAÚJO, SOUZA e MACHADO, 2019; FERNANDES e QUEIROZ, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

A Caatinga Sedimentar está localizada nas bacias sedimentares, e é composta principalmente por plantas lenhosas de pequeno porte, enquanto as ervas e os subarbustos não aparecem com frequência e apresentam uma baixa taxa de deciduidade foliar durante a estação seca. A flora da Caatinga em áreas arenosas geralmente abarca espécies restritas, a exemplo da região das dunas do São Francisco, ou que irão ocorrer de forma disjunta

entres diferentes bacias sedimentares. Nas áreas onde os solos são mais férteis e com um suprimento de água mais alto do que o do entorno, é possível encontrar uma Caatinga arbórea, caracterizada por árvores mais altas (COSTA *et al.*, 2015; FERNANDES e QUEIROZ, 2019; SERAFIM FILHO *et al.*, 2021).

Essa variação da vegetação está associada também com a resposta da hidrologia superficial aliada a hidrogeologia e aos tipos de rochas, assim, a vegetação nas áreas de topografia mais elevadas, apresentará uma característica de vegetação mais úmida perenifólia ou semidecidual, por outro lado nas áreas de encostas e inselbergs em que predominam rochas cristalinas, e em geral apresentam um potencial hidrogeológico muito fraco, a vegetação é mais seca ou caatinga arbórea, o que já é denominado por diversos autores de “caatingas” por haver essa diversidade de formações (LEAL *et al.*, 2003; FEITOSA *et al.*, 2004).

1.4. Índices de vegetação e monitoramento de áreas secas e vegetação sazonal

As florestas tropicais sazonalmente secas, apresentam um padrão típico do ciclo fenológico anual, com valores influenciados pelo ciclo de chuvas e que são delimitados pelos parâmetros fenológicos de início e fim da estação chuvosa. Desse modo, o monitoramento de vegetação sazonal a partir dos índices de vegetação, deve levar em consideração a necessidade de fazer uma avaliação tanto em período seco, quanto úmido, buscando avaliar a amplitude do comportamento das florestas sazonais. A importância de fazer esse tipo de análise, versa sobre a relação que a vegetação tem com os períodos de maior ou menor incidência de precipitação, mas principalmente pelo fato de haver uma variabilidade interanual na vegetação, fazendo com que seja imprescindível a análise da sua sazonalidade (ARAÚJO; SOUZA e MACHADO, 2019; GERARD *et al.*, 2020; PASSEL, KEERSMAECKER e SOMERS, 2020).

Portanto, há uma dificuldade de atribuir padrões para a classificação da vegetação em ambientes secos, pois o índice de vegetação vai depender da quantidade de chuva/umidade e apresentará respostas diferentes cada vez que houver uma mudança na quantidade da precipitação. No caso da relação com a resposta espectral do solo, há uma dificuldade maior em unir essas informações, especialmente se o tipo de solo e de geologia não forem homogêneos (DRORI *et al.*, 2020). A resposta imediata da cobertura vegetal das florestas tropicais sazonalmente secas à precipitação, além de alterar a paisagem atua como protetora do solo, diminuindo a perda de sedimentos pelo

escoamento superficial, desse modo, a caracterização da dinâmica da sazonalidade através de observações por sensores deve ser levada em consideração nos estudos das florestas secas (CUNHA, 2014).

Existem muitos desafios e limitações no monitoramento das florestas secas, a partir do uso do SR, tais quais podem estar relacionadas com a resolução espacial, espectral e temporal dos sensores, mas também com os fatores biofísicos de cada área. A dinâmica ecossistêmica, associada a períodos secos e chuvosos, podem gerar incertezas nas estimativas por sensores (MCNICO *et al.*, 2018; GAO *et al.*, 2020).

É preciso ainda considerar a heterogeneidade espacial, temporal e a complexidade das florestas tropicais sazonalmente secas, é possível relacionar tal complexidade com pelo menos quatro fatores que juntos se configuram como grandes lacunas no monitoramento dessas áreas. O primeiro deles está relacionado com a coexistência de vegetação lenhosa e herbácea, variando desde áreas mais abertas a dossel fechado. O segundo fator diz respeito a sazonalidade da floresta seca que é variável ao longo de cada ano. O terceiro fator, relaciona-se aos distúrbios como os incêndios naturais, histórico de uso da terra, corte de lenha, que acabam alterando o funcionamento dessas florestas. Por fim, são de extrema importância os dados de solo que na maioria das áreas de florestas tropicais sazonalmente secas são escassos (DEXTER *et al.*, 2018; PÖTZSCHNER *et al.*, 2022).

Cabe destaque aos ciclos sazonais de crescimento da vegetação, que impulsionados por parâmetros biofísicos, como temperatura, duração do dia e disponibilidade de umidade do solo apresentam grande interferência nos sistemas ecológicos e biogeoquímicos. Nas áreas de FTSS a fenologia vegetal (tempo de crescimento da vegetação, senescência e dormência) é considerada espacialmente heterogênea e temporalmente dinâmica, especialmente devido a relação entre a vegetação e os ciclos de precipitação que influencia na grande variabilidade interanual. São essas características fenológicas somadas à heterogeneidade espacial e temporal, às limitações nos dados de SR e nos métodos usados para recuperar estimativas de fenologia, baixo desempenho de IVs sobre copas esparsas, nas quais há a interferência do solo, baixa resolução espacial e não levar em consideração dos dados de precipitação, tornam a análise e o monitoramento das FTSS, muito desafiadores e complexos (SMITH *et al* 2020).

Uma das formas de monitoramento dessas áreas de FTSS através de dados por sensor é a partir de séries temporais. Utilizar uma série temporal permite a identificação das diferenças interanuais, mas também a variação intra-anual (DUTRIEUX *et al.*, 2015).

Quatro abordagens utilizando séries temporais foram descritas por Hirschmugl *et al.* (2017) para as FTSS. A primeira delas está baseada na detecção de mudança baseada em um limiar que irá separar a área natural da degradada, a desvantagem dessa abordagem é que os limites são determinados de forma empírica e difíceis de serem utilizados em outras áreas de estudo. A segunda está relacionada ao ajuste de curva, baseada em modelos de regressão entre as variáveis espectrais e o tempo. A inclinação da curva de regressão auxilia no entendimento do aumento ou diminuição da cobertura da copa, por exemplo. A terceira abordagem, trata-se do ajuste de trajetória, muito utilizada para detectar tipos de degradação, essa só funciona se a trajetória observada corresponder a uma curva de degradação típica pré-definida. A última abordagem é a segmentação de trajetória, decompondo-a em segmentos de linha reta para capturar tendências amplas, porém é uma aplicação limitada, pois não considera a fenologia da vegetação (GAO *et al.*, 2020).

Os índices de vegetação são variáveis muito utilizadas nas análises de séries temporais para monitoramento de vegetação, a partir das informações de reflectância de ondas eletromagnéticas do dossel obtidas de sensores passivos, essa é determinada pelas características morfológicas da folha. O tipo de vegetação, o conteúdo de água nos tecidos, dentre outros fatores, influencia no tipo de reflectância das plantas. As principais aplicações do SR na vegetação estão baseadas na região ultravioleta (UV: 10-380nm), na região do visível (R: 620-750nm, G:495-570nm, B:450-495nm) e na faixa do infravermelho próximo e médio (850-1700 nm). A taxa de emissividade de uma folha de uma FTSS crescida e sem nenhum estresse biótico ou abiótico geralmente varia de 0,88 a 0,94. Essa taxa de emissividade da vegetação nas regiões do infravermelho próximo e médio tem recebido bastante atenção e os índices que são extraídos a partir dessas faixas espectrais contribuem para análises como quantificação do crescimento e vigor das plantas relacionadas ao teor de água, pigmentos, teor de açúcar e carboidratos, teor de proteína e aromáticos, entre outros (XUE e SU, 2017; GIOVOS *et al.*, 2021; PÔÇAS *et al.*, 2020).

Assim, é perceptível o quanto a interpretação quantitativa das informações de sensoriamento remoto da vegetação é uma tarefa complexa. Muitos estudos combinam os dados das bandas de infravermelho próximo e vermelho de acordo com seus objetivos, porém, esse tipo de combinação apresenta algumas desvantagens, como falta de sensibilidade para quantificar a biomassa vegetal. Essas limitações ficam mais visíveis quando os IV são aplicados em dossel heterogêneo, quando não se leva em consideração

o tipo de solo e a variabilidade espacial, sazonal e climática também podem dificultar as análises de uma vegetação seca (XUE e SU, 2017).

1.4.1. Índices de vegetação (IV)

A utilização dos índices facilita a obtenção e modelagem de parâmetros biofísicos das plantas, como a área foliar e a biomassa, e através do infravermelho, facilita a identificação de importantes informações (XUE e SU, 2017). Os índices são combinações de reflectâncias espectrais de duas ou mais bandas, que têm o objetivo de agrupar e intensificar a relação desses dados com os parâmetros biológicos e físicos da vegetação. O tipo e as características de condição da vegetação permitem a variação da reflectância no tempo e espaço, permitindo o monitoramento da dinâmica da vegetação em diferentes escalas espaciais e temporais.

Os índices de vegetação mais comumente utilizados são o Índice Vegetação por Diferença Normalizada -IVDN (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – IVAS (*Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI*), o Índice de Vegetação Realçado (*Enhanced Vegetation Index – EVI*), Índice de Área Foliar – IAF (*Leaf area index - LAI*) e o Índice de Diferença Normalizada de Água (*Normalized difference Water Index - NDWI*), sendo o primeiro o que mais aparece nas pesquisas relacionadas à florestas tropicais sazonalmente secas.

Analisando as pesquisas que foram feitas utilizando índices de vegetação tanto em âmbito internacional, quanto nacional, foi possível identificar que em um universo de 187 trabalhos, 74 utilizaram o IVDN na literatura internacional e 15 na literatura nacional, enquanto o IVAS foi utilizado 8 vezes na literatura internacional e 31 na nacional, já os índices: IAF, NDWI e EVI foram utilizados 17, 2 e 13 na literatura internacional e 16, 6, 6 na nacional, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Quantificação dos Índices de Vegetação (IVs) na literatura internacional e nacional

IV's	Quantidade de trabalhos na literatura brasileira	Quantidade de trabalhos na literatura Internacional
IVDN (NDVI)	15	74
IVAS (SAVI)	31	8
IAF (LAI)	16	17
NDWI	6	2
EVI	6	13
Total	74	114

Autoria própria, 2021

O IVDN é um dos principais índices utilizados para o monitoramento de vegetação sazonalmente seca, ele é aplicado principalmente com o objetivo de estimar a fração de radiação fotossinteticamente, que é absorvida pelo dossel, para assim contribuir com a avaliação do verde da vegetação ao longo do tempo e do espaço (NORRIS e WALKER, 2020 e LIU *et al.*, 2021).

Esse índice também tem sido eficaz para o monitoramento da fenologia da vegetação, para identificar a resposta espectral e a relacionar com as condições de secas. Em muitos casos, o IVDN é correlacionado com os dados de chuva, sendo eficaz para entendimento da variabilidade do clima na fenologia da vegetação, mostrando que as tendências fenológicas observadas são atribuídas à variabilidade do clima. O IVDN também tem sido usado juntamente com outros conjuntos de dados de vegetação oriundos do sensoriamento remoto para aprimorar as informações fenológicas que podem ser adquiridas, melhorando assim as estimativas da fenologia da vegetação (BOKE-OLÉN *et al.*, 2018; OSUNMADEWA, *et al.*, 2018; PHILIPP; WEGMANN e KÜBERT-FLOCK, 2021).

Por outro lado, é interessante apontar os desafios do uso do IVDN no monitoramento das florestas secas, pois, esse índice é sensível aos efeitos do solo, atmosfera, nuvem e/ou sombra, sendo necessário a calibração dos dados. Além disso, esses dados não são temporariamente suficientes para caracterizar diferenças interanuais nas datas de início da fase fenológica ou mudanças na produtividade. Essas transições rápidas do dossel são indicadores importantes da sensibilidade à mudança climática desses ecossistemas florestais e devem ser monitorados usando os dados por satélites, os dados de campo e outra possibilidade seria a representação da série de IV a partir de uma função matemática para o ciclo anual, com seus parâmetros variando em cada ano da série (RANKINE *et al.*, 2017; XIU e SU, 2017; ANTÔNIO-GUZMÁN, *et al.*, 2019; SILVA-FILHO *et al.*, 2020).

Os parâmetros dessas funções podem ser ligados ao padrão do ciclo fenológico, representado pelo IV, e aos padrões das variáveis da precipitação para aquele determinado ano, podendo abrir interessantes possibilidades de uso entre tais funções e a análise de interação entre vegetação e clima. Além disso, nas áreas que apresentam uma grande quantidade de nuvem, o uso de uma função matemática que possa reconstruir séries temporais do IVDN é de grande importância para análises de quantificação e qualificação da biomassa, além de fornecer informações importantes relacionadas ao ciclo de

crescimento e senescência da vegetação e o entendimento de sua fenologia (SILVA-FILHO *et al.*, 2020).

Outra questão que merece atenção, diz respeito a abordagem de limite constante, que define um valor mínimo do índice de vegetação e não classifica como vegetação os valores abaixo deste limite, sem levar em consideração sua localização geográfica e/ou as condições ambientais. Para o IVDN, esse valor de limite inferior geralmente é 0,2, que foi considerado ideal para a classificação da vegetação em ambientes úmidos (CARLSON e RIPLEY, 1997; SOBRINO, JIMÉNEZ-MUÑOZ e PAOLINI, 2004; WONG, FUNG e YEUNG, 2019; DRORI *et al.*, 2020).

Porém, Drori *et al.*, (2020) constataram que esse limite inferior muda com a precipitação média anual, variando de menos de 0,1 nas áreas semiáridas, a mais de 0,25 na área métrica do Mediterrâneo, deixando claro que o uso desses limites fixos, a partir do uso de IVs e de imagens orbitais, para ambientes com déficit hídrico, não apresenta uma resposta espectral coerente para uma classificação generalizada da vegetação, pois nesses ambientes a vegetação vai responder a fatores como a precipitação. Portanto, usar um valor constante como limite inferior para classificar vegetação levará à detecção de falso-negativo em regiões áridas e detecção de falso-positivo em regiões úmidas.

Outros índices que são utilizados para o monitoramento da vegetação são: o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS), Índice de Área Foliar (IAF), Índice de Vegetação Realçado (EVI) e o Índice de Diferença Normalizada de Água (NDWI), porém a maioria dos estudos com esses índices são comparativos.

O IVAS é também utilizado para a caracterização e monitoramento de áreas de vegetação, porém é um índice que não se destaca muito nas pesquisas das FTSS do restante do mundo, sendo bastante utilizado no Brasil para a vegetação de Caatinga, geralmente para uso e ocupação da superfície e na comparação com outros índices de vegetação. Nas pesquisas brasileiras foi difundido o entendimento de que o IVAS seria mais eficaz para a vegetação de Caatinga, porém na maioria das vezes, sem levar em consideração a influência da precipitação e da sazonalidade. Embora vários autores destaquem que o IVAS é mais eficaz, o próprio criador do índice diz que somente em conjuntos de dados globais e quando os dados são comparados em diferentes tipos de solo que o IVDN sofre com a influência do solo que o IVAS é capaz de minimizar (HUETE, 1988; AZEVEDO e ALVES, 2015; RIBEIRO, SILVA e SILVA, 2016).

Ao efetuar uma comparação entre o IVAS e o IVDN em uma área de vegetação de Caatinga no Sertão da Paraíba, Araújo, Souza e Machado (2019), perceberam que

ambos tiveram uma resposta muito parecida, concluindo que embora o IVDN não seja o mais utilizado para análise de vegetação de Caatinga, respondeu satisfatoriamente à análise dessa.

O IVAS foi estabelecido para melhorar a sensibilidade do NDVI a interferência do solo, por isso é adicionado em sua fórmula um fator (L) que visa amenizar esses efeitos de background do solo. O valor de L é determinado de acordo com as características de vegetação do ambiente e foi definido a partir da correlação com o Índice de Área Foliar (IAF), assim, o IVDN foi relacionado com o IAF e para uma densidade de vegetação constante quando o IVDN variou de 0,24 a 0,60 adotou-se o valor de $L = 0,5$ e quando essa variação foi entre 0,44 e 0,74 o valor de $L = 1$, acima de 0,74 adota-se o valor de $L = 0,25$ (HUETE, 1988).

Desse modo, quando há um elevado grau de densidade da vegetação atribui-se a esse fator o valor de 0,25 o que significa dizer que o solo não tem efeito algum sobre a reflectância daquela vegetação. Quando as condições ambientais são consideradas normais e há um padrão médio de vegetação, usa-se o valor 0,5, já em solo totalmente nu ou com pouca vegetação é usado o valor 1. No entanto, esses valores são generalizados e não levam em consideração as especificidades da vegetação, especialmente quando se trata de FTSS que são amplamente influenciadas pelo clima (RIBEIRO *et al.*, 2016; XUE e SU, 2017; ARAÚJO, 2018; PÔÇAS *et al.*, 2020).

Pensando nas particularidades de cada vegetação, foi pensado num Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado - MIVAS (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index - MSAVI*), nessa modificação o valor de L é substituído por uma função variável. Dessa versão surgem três novas variações do IVAS (IVAS2, IVAS3 e IVAS4) baseadas nas considerações teóricas de efeito de solos secos e úmidos (XUE e SU, 2017), além do Índice de Vegetação Secundário Ajustado ao Solo Modificado-MIVAS2 (*Secondary Vegetation Index Adjusted to Modified Soil-MSAVI2*), esse último possui um algoritmo mais simples e não se baseia no princípio da linha do solo (RICHARDSON E WIEGAND, 1977; GUO *et al.*, 2019).

O IAF, outro índice bastante utilizado na literatura internacional e nacional, é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. É um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, e toma-se como parâmetro para o seu cálculo o IVAS e mais três constantes (0,69; 0,59; 0,91), considerando o valor máximo do IVAS, o valor máximo atingido pelo IAF é 6,0 quando o IVAS vale 0,69 (ALLEN *et al.*, 2002). Por ser um parâmetro estrutural da vegetação,

esse índice é de grande importância em análises quantitativas de processos físicos e biológicos relativos à dinâmica da vegetação (ARAÚJO, 2018).

Esse índice pode ser considerado sensível a variação climática, aumentando com o aumento da umidade e diminuindo com a sazonalidade, também é sensível as condições de fenologia, perenidade, tipo de folhas, etc. (SUMIDA *et al.*, 2018; PARKER, 2020). Embora saturação do IAF seja observado em maior escala em vegetação úmida e densa, há interferência também nesse índice na vegetação seca, pois a estimativa para o IAF tem melhor desempenho em sistemas homogêneos e uniformes, o que não é o caso das FTSS, além do mais, o solo também interfere em sua estimativa, por exemplo, para dosséis esparsos a interferência do solo aumenta com a diminuição dos valores do índice (SMITH *et al.*, 2019).

Outro índice que deve ser levado em consideração é o EVI, esse foi proposto por Liu e Huete (1995) e surge como um mecanismo de *feedback*, apresentando um parâmetro para corrigir de forma simultânea os efeitos do solo (L) e da atmosfera (C_1 e C_2), esses parâmetros são empiricamente determinados e assumem valores de 6,0; 7,5; e 1,0, respectivamente, além de possuir em sua fórmula um fator de ganho ajustado (G) que apresenta valor de 2,5. Esse índice é mais sensível a vegetação de alta densidade (JENSEN, 2009; XUE SU, 2017; PÔÇAS *et al.*, 2020).

Identificar a amplitude da vegetação se torna interessante para entender o comportamento e a dinâmica dessas áreas perante a sazonalidade e a precipitação. Para tanto, o monitoramento dessas áreas se torna imprescindível, especialmente quando os métodos utilizados envolvem o uso de IVs e outras abordagens metodológicas voltadas para o uso das geotecnologias. As florestas tropicais sazonalmente secas por estarem sob influência dos parâmetros climáticos requerem uma análise cuidadosa e um monitoramento mais apurado, caso contrário, são passíveis à geração de falsos resultados.

1.4.2. Sensores e métodos utilizados para o monitoramento de áreas secas e vegetação sazonal

A maior parte dos estudos sobre o monitoramento das florestas tropicais sazonalmente secas utilizam o satélite MODIS, mais precisamente o produto pronto do IVDN (CAI *et al.*, 2017; LEROUX *et al.*, 2017; MARIANO *et al.*, 2018; GERARD *et al.*, 2020; ZOU *et al.*, 2020), seguido pela série de satélites Landsat (GAO *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021; CUNHA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2018), é a facilidade de acesso e a

disponibilidade das imagens desses sensores que fazem com que grande parte das pesquisas utilizem eles.

De acordo com Bobée *et al.*, (2012), o produto do MODIS pode ser usado como proxy do status da vegetação, porém não é interessante para a diferenciação da fenologia da vegetação dominante no pixel, concluindo eles que as séries temporais MODIS não são suficientes para análise da dinâmica da vegetação. Outro problema no uso desses produtos é a resolução espacial, por ser considerada de moderada a baixa (250 - 500m) ela não permite a diferenciação dos tipos de vegetação nem que as mudanças em sua cobertura vegetal sejam avaliadas, sejam elas de ordem antrópica ou natural, porém seu tempo de revisita é quase diário, se caracterizando como um satélite de alta resolução temporal (BOBÉE *et al.*, 2012; CUNHA *et al.*, 2020; ZENG *et al.*, 2020).

Em ambientes de FTSS, o sensor MODIS foi utilizado para o estudo da fenologia e comparação de índices de vegetação (CHRISTIAN *et al.*, 2015; RANKINE, 2017; GUZMÁN, SANCHEZ-AZOFEIFA e ESPÍRITO-SANTO, 2019), evapotranspiração (QUEIROGA *et al.*, 2017; MUTTI *et al.*, 2019), mapeamento de biomassa (PÖTZSCHNER *et al.*, 2022), desmatamento (LAND *et al.*, 2021; LUZ *et al.*, 2022) entre outros.

No caso dos sensores a bordo do Landsat, esses apresentam características adequadas para representar as variações espaciais, com uma resolução espacial de 30m, apresentam um rico banco de dados gratuito, atuando desde o início da década de 1970 até o momento atual, mas possui uma baixa amostragem temporal (resolução temporal de 16 dias) e principalmente na área intertropical, muitas de suas imagens têm interferência de nuvens o que diminui ainda mais a quantidade de imagens disponíveis. Além disso, muitas das mudanças fenológicas ocorrem num período mais curto do que o tempo de revisita do satélite. O Landsat foi o primeiro sensor usado na caracterização da sazonalidade da vegetação em escalas regionais (CUNHA *et al.*, 2020; SILVA-FILHO *et al.*, 2020; ZENG *et al.*, 2020).

Outros sensores menos frequentemente utilizados são o AVRR do satélite NOAA (ZHANG *et al.*, 2018), o CBERS (OLIVEIRA, CHAVES e LIMA, 2009) e o Sentinel (PASSEL *et al.*, 2020), este último apresenta uma boa resolução espacial (de até 5m), porém é de operação recente, havendo imagens disponíveis apenas a partir de 2014 (ESA, 2021). Alguns sensores apresentam ótima resolução espacial, porém não fornecem imagens gratuitas, como é o caso do GeoEye, Spot e do Ikonos (EMBRAPA, 2018). Dois satélites chineses de alta resolução espacial foram lançados recentemente (2020 e 2021),

o SuperView-2 (SV-2) com 40cm de resolução, que poderá auxiliar nos estudos florestais, Beijing-3 (BJ-3) com 50cm (TECTERRA, 2022), além desses foi lançado também o Amazônia 1, satélite brasileiro que terá como principal objetivo o monitoramento da floresta Amazônica (INPE, 2022).

Além do uso dos variados sensores existentes, no estudo da fenologia, visando minimizar alguns desafios enfrentados pelo uso dos dados por SR, como a interferência de nuvens e/ou sombra, ângulo do sol, efeitos de visualização fora do nadir, entre outros, alguns métodos também são utilizados, como: Método de Composição de Valor Máximo (MVC) e os de suavização, esses têm por objetivo minimizar o ruído residual e reconstruir séries temporais com uma condição mais representativa da vegetação (Quadro 1). As principais técnicas utilizadas para reconstrução das séries temporais são os métodos empíricos; métodos de ajuste de curva e o método baseado em limite (ATKINSON *et al.*, 2012; ZENG *et al.*, 2020;).

O Método de Composição de Valor Máximo (MVC), utiliza a composição de produtos MODIS, por exemplo, para melhorar a resolução temporal. O MVC é conhecido por selecionar o valor do índice de vegetação mais alto de uma série de imagens diárias para uma janela de compostagem temporal pré-definida para a representação dos alvos terrestres no conjunto de dados da série temporal. Foi considerado um método simples e eficaz na redução de ruídos e estabelecimento de séries temporais representativas. Porém em períodos com muita nuvem, esse método nem sempre será totalmente eficaz (ZENG *et al.*, 2020).

Os métodos de suavização empírica baseiam-se como o próprio nome diz nos conhecimentos empíricos ou em suposições, sua vantagem é a simplicidade de aplicação, porém são sensíveis aos parâmetros empíricos, sendo assim, se a série temporal original apresentar dados contínuos ausentes, o desempenho de aplicação do método também será ruim. A integração de informações espaciais e temporais também é utilizada para reconstrução de séries temporais de índice de vegetação, se mostrando serem úteis para reconstrução dos dados de séries temporais no nível de pixel, principalmente para períodos de dados ausentes contínuos (JÖNSSON *et al.*, 2018; CAO *et al.*, 2018; ZENG *et al.*, 2020).

Visando propor um método de detecção de fenologia, para estimar a sazonalidade, Jönsson *et al.* (2018), utilizaram dados do Landsat e Sentinel 2 e o método empírico, baseado em mínimos quadrados separáveis com restrições de caixa ajustados às funções do modelo, ele baseado na rotulagem precisa da qualidade do pixel e busca obter

parâmetros estáveis, para a disponibilidade de dados de séries temporais longas. Os autores constataram que esse método é suficiente para modelar variações interanuais e robusto o suficiente quando não há dados suficientes para a análise.

O método empírico também foi utilizado por Jin e Xu (2013), a partir da criação de um modelo não linear automatizado, com o objetivo de reduzir o ruído da série temporal do IVDN e reconstruir os dados da série do Modis. Diao (2019) também utilizou o método empírico, a partir dos dados do Modis. Sua pesquisa desenvolveu um modelo complexo baseado em rede para monitorar a transição da folhagem entre estações. O autor denominou-o de modelo feno-rede, tal modelo caracteriza o processo fenológico através do rastreamento da assinatura espectral e serviria como complemento das abordagens baseadas em ajuste de curva.

Os métodos de ajuste de curva são considerados o método de detecção de fenologia mais comum, são conhecidos por aplicarem funções matemáticas para o ajuste de séries temporais dos índices de vegetação a uma função específica. Esse método pode suprimir o ruído dos dados e é considerado mais fácil de se adaptar a variadas situações, pois as funções matemáticas aproximam a trajetória das séries temporais e não é necessário o uso de restrições empíricas nem limites pré-definidos. Porém, as curvas dos IV nem sempre são regulares, assim a função poderá afetar diretamente a precisão e da extração das análises, fazendo com que possa gerar falsos resultados (ZENG *et al.*, 2020). Algumas pesquisas foram desenvolvidas utilizando o método de ajuste de curva e os dados de fusão entre (GAO *et al.*, 2017), Spot e RapidEye (VRIELING *et al.*, 2017) e Sentinel (VRIELING *et al.*, 2018), todas aplicadas ao estudo da fenologia.

Os métodos de limiares assumem que os estágios fenológicos se iniciam quando os valores do IV atingem um valor específico. Esse método é considerado o mais simples para o estudo da fenologia a partir de séries temporais. Ele utiliza duas possibilidades, a primeira baseada em um limiar fixo que de forma arbitrária estabelece um valor de índice fixo e único, a exemplo, têm-se o valor de 0,17 do IVDN e assim estaria representando o início do estágio da floração (ZENG, *et al.*, 2020). Porém especialmente em áreas de FTSS esse limite não pode ser fixo, pois sua vegetação é influenciada pela quantidade de precipitação. A outra possibilidade é o de limiar dinâmico que será baseado numa métrica que é calculada a partir dos dados da série temporal do índice (ZENG *et al.*, 2020; DRORI *et al.*, 2020).

Quadro 1. Alguns métodos utilizados para o estudo da vegetação

Referência	IVs	Mapa	Resolução espacial	Resolução temporal	Sensores remotos	Validação	Forma de classificação	Localidades/vegetação	Parâmetros ambientais analisados	Métodos de Correlações
STAN <i>et al.</i> , 2020	IVDN	SIM	250m (IVDN) 1000m (banda termal)	Dezesseis e oito dias	MODIS	X	x	Clima semiárido e vegetação seca	Temperatura da superfície da terra; Precipitação	Correlação de Pearson
DRORI <i>et al.</i> , 2020	IVDN	Sim	10m	Cinco dias	Sentinel-2	Utilização de ortofoto aérea, classificação manual e estatística Kappa	Manual	regiões de clima semiárido e mediterrâneo em Israel	Precipitação	Modelo PROSAIL
SILVA FILHO <i>et al.</i> , 2020	IVDN	x	30m	Dezesseis dias	Landsat 5,7 e 8	Métodos estatísticos	x	Cariri paraibano (semiárido tropical e floresta seca)	Precipitação	Qui-quadrado reduzido e coeficiente de determinação (R ²)
PASSEL; KEERSMAECKER e SOMERS, 2020	IVDN	Sim	10m	Cinco dias	Sentinel-2	Coeficiente de correlação de Spearman	Classificação de Cena	Etiópia e Tanzânia (semiárido tropical e floresta seca)	Precipitação	Regressão linear, uma Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) e modelo de regressão Random Forest
LEROUX <i>et al.</i> , 2017	IVDN	Sim	250m	Composição do produto de dezesseis dias	MODIS	Regressão Ordinária de Mínimos Quadrados	Classificação supervisionada	Sahel	Precipitação e uso da terra	Correlação de Person
MARIANO <i>et al.</i> , 2018	IAF	Sim	500m	Composição do produto de oito dias	MODIS	X	Classificação automática	Semiárido brasileiro	Sazonalidade; El Niño e La Niña	Regressão linear
SILVA <i>et al.</i> , 2018	IVDN	Sim	30m	Dezesseis dias	Landsat 5 e 7	Métodos estatísticos	x	Semiárido brasileiro	Precipitação; El Niño e La Niña; Sazonalidade	Mínimos Quadrados Ordinários
CUNHA <i>et al.</i> , 2020	IVDN e EVI	Sim	30m	Dezesseis dias	Landsat 5, 7 e 8	A partir de satélites de alta resolução RapidEye e Google Earth Pro	x	Semiárido brasileiro	Albedo; Precipitação	Regressão linear; TSS-RESTREND
JÖNSSON <i>et al.</i> 2018	IVDN	Sim	30m e 10m	Dezesseis dias e Cinco dias	Landsat e Sentinel 2	Função crítica	x	Centro da Suécia Floresta de coníferas	Sazonalidade	Método empírico
DIAO, 2019	EVI e IVDN	Sim	250m	Composição do produto de oito dias	MODIS	X	x	Harvard Forest - Massachusetts Floresta decídua temperada	x	Método empírico
GAO <i>et al.</i> , 2017	IVDN	Sim	30 m (fusão)	Dezesseis dias	Modis e Landsat	Desvio padrão	x	Pradarias e savanas	Sazonalidade e Uso e cobertura da terra	Método de ajuste de curva
VRIELING <i>et al.</i> , 2017	IVDN	Sim	5 e 10m	Vinte e seis dias / vinte e quatro horas	Spot e RapidEye	X	x	Temperado	Sazonalidade	Método de ajuste de curva

RIELING <i>et al.</i> , 2018	IVDN	Sim	10m	Cinco dias	Sentinel	Desvio padrão	Scene Classification	Temperado	Sazonalidade	Método de ajuste de curva – Correlação de Person
BARBOSA <i>et al.</i> , 2019	IVDN	Sim	3km	Quinze minutos	SEVIRI	Avaliação de dados <i>in situ</i> e métodos estatísticos	Classificação por árvore de decisão	Semiárido brasileiro	Precipitação	Correlação de Person
MA <i>et al.</i> , 2020	EVI	Sim	500m	Dezesseis dias	MODIS	Validação cruzada estratificada	x	Semiárido da Austrália	Precipitação	Modelo de partição grama-árvore

Autoria própria, 2022

Analisar as Florestas tropicais sazonalmente secas a partir de dados de SR não se configura como uma tarefa fácil, devido a sua complexidade e a sua dinâmica sazonal, a vegetação de Caatinga, classificada como uma FTSS, esboça bem essa complexidade, visto que existe uma relação linear entre a precipitação e essa vegetação em escala de tempo interanual. Sabendo disso, um grande desafio é compreender essa dinâmica vegetação-precipitação e analisar sua resposta a partir dos índices de vegetação e dos variados métodos disponíveis que podem auxiliar no entendimento dessas áreas.

1.4.2.1. Métodos estatísticos para o monitoramento de áreas secas e vegetação sazonal

Os métodos estatísticos são um conjunto de técnicas e procedimentos utilizados para coletar, organizar, analisar, interpretar e apresentar dados. Eles são aplicados em uma variedade de campos, desde a ciências naturais até as finanças e o planejamento urbano. Alguns exemplos de métodos estatísticos incluem a análise de regressão, teste de hipóteses, análise de variância, análise de séries temporais, entre outros. Essas técnicas podem ser aplicadas de diferentes maneiras, dependendo do tipo de dados disponíveis e das perguntas que se deseja responder.

A análise de regressão e correlação são dois métodos estatísticos fundamentais amplamente utilizados em diversas áreas, para compreender e quantificar as relações entre variáveis. Ambos os métodos visam investigar a natureza e a força das associações entre as variáveis de interesse, mas têm abordagens ligeiramente diferentes.

A regressão é usada quando se deseja prever ou explicar o valor de uma variável dependente com base em uma ou mais variáveis independentes. Por outro lado, a correlação é usada para medir o grau e a direção da relação linear entre duas variáveis. Ela não implica causalidade, apenas indica se as duas variáveis estão associadas e em que magnitude. A correlação pode ser positiva (ambas as variáveis aumentam juntas), negativa (uma variável aumenta enquanto a outra diminui) ou neutra (nenhuma relação linear) (MONTGOMERY et al., 2012; ROGERSON, 2012; HAIR et al., 2014).

Ambos os métodos têm premissas subjacentes que devem ser atendidas para garantir a validade das conclusões tiradas a partir dos resultados (FIELD, 2013). Algumas dessas premissas incluem:

Independência dos dados: As observações devem ser independentes umas das outras, ou seja, os valores de uma variável não devem ser influenciados pelos valores de outra variável.

Linearidade: A relação entre as variáveis deve ser aproximadamente linear. Caso contrário, a análise de regressão pode produzir estimativas imprecisas.

Homoscedasticidade: A variabilidade dos erros de previsão deve ser constante em todos os níveis das variáveis independentes. Se a variabilidade dos erros muda conforme os valores das variáveis independentes, isso é chamado de heteroscedasticidade e pode levar a conclusões incorretas.

Normalidade dos resíduos: Os resíduos (ou seja, as diferenças entre os valores observados e os valores previstos) devem ser distribuídos normalmente em torno de zero. A violação dessa premissa pode indicar que o modelo não se ajusta bem aos dados.

Esses métodos são comumente utilizados para o entendimento das FTSS e sua relação com a precipitação. Utilizando a correlação, destacam-se pesquisas em florestas secas na Argentina (BURRY *et al.*, 2018), na Etiópia (GEBRU *et al.*, 2020) e na Costa Rica (ZOU *et al.*, 2020). Mais especificamente para a Caatinga pesquisas destacam a correlação entre a precipitação e os dados de vegetação (SANTOS *et al.*, 2019; SOUZA e HOOKE, 2021; SOUZA *et al.*, 2023). Com relação a regressão, também há destaque de pesquisas que buscam entender a relação entre a precipitação e as FTSS (SANTOS, BATISTA e MOURA; 2017; BURRY *et al.*, 2018; SILVA *et al.*; 2019; GEBRU *et al.*, 2020 PASSEL *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021; SOUZA e HOOKE, 2021; MABUNDA *et al.*, 2021)

CAPÍTULO II



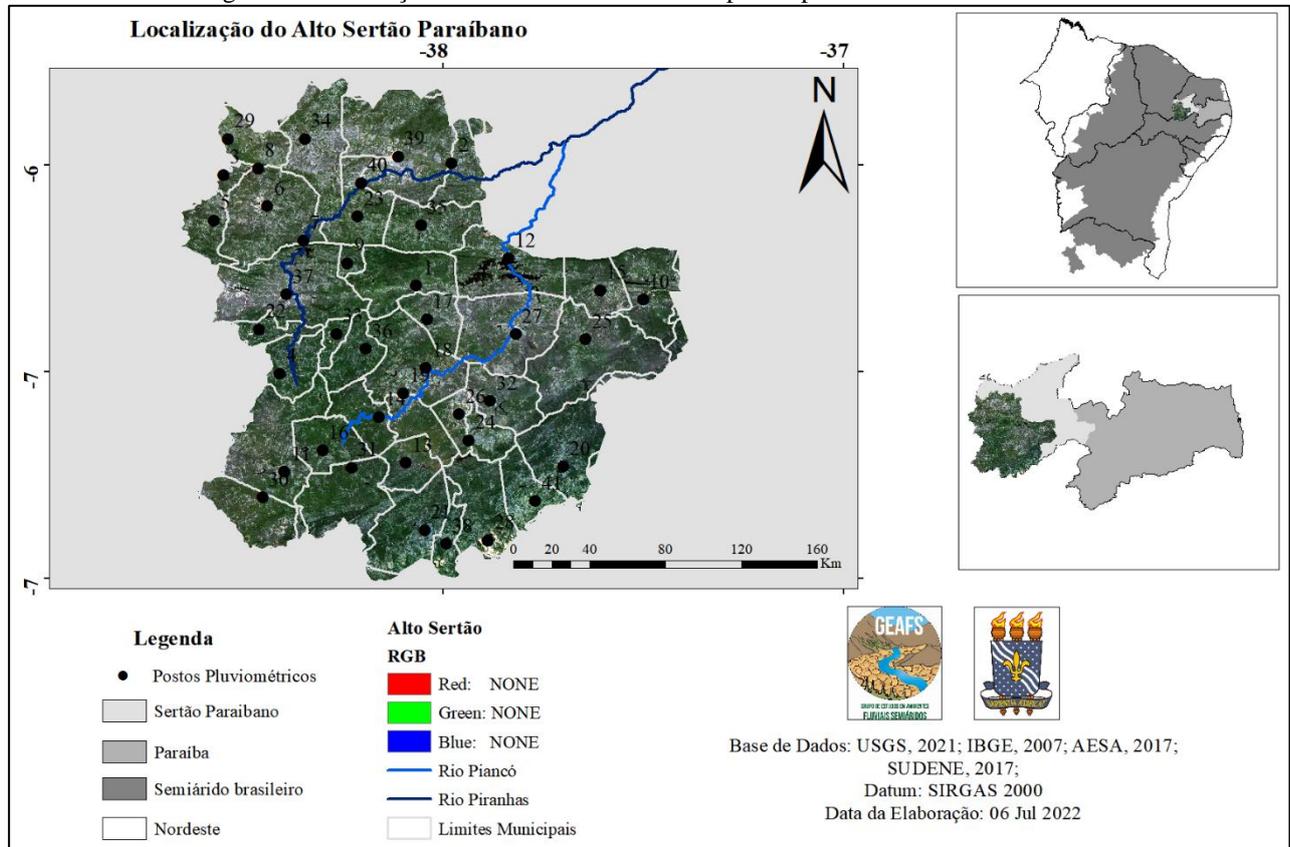
44

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA

2.1. Localização da área de estudo

O Alto Sertão está localizado na região semiárida brasileira, no estado da Paraíba, distante aproximadamente 400km da capital João Pessoa. Corresponde à faixa de terra mais a oeste do estado, faz divisa com os estados do Ceará e Pernambuco. Apresenta um relevo diversificado com áreas planas, forte onduladas e escarpadas. Grande parte do Alto Sertão, apresenta uma precipitação de aproximadamente 700 mm/ano e conta com 43 postos pluviométricos de altitudes variadas, distribuídos em seus 39 municípios, os postos pluviométricos foram utilizados como base para a escolha das áreas analisadas, a partir das machas de vegetação. A área também é cortada pelos rios Piranhas e Piancó e dispõe do maior reservatório de água da Paraíba, o sistema Coremas-Mãe D'Água, construído no rio Piancó (Figura 3 e Tabela 2) (FRANSCISCO, 2010; ARAÚJO, 2018).

Figura 3: Localização do Alto Sertão – PB e dos postos pluviométricos da área



Autoria própria, 2022

Tabela 2. Localização dos Postos pluviométricos

Localidade	Altitude (m)	Anos da série
Aguiar	272	1994-2022
Aparecida	214	1994-2022
Boa Ventura	314	1994-2022
Bom Jesus	320	1996-2022
Bonito de Santa Fé	593	1994-2022
Cachoeira dos Índios	336	1996-2022
Cajazeiras	299	1994-2022
Aç. Engenheiro Ávidos	295	1994-2022
Aç. Lagoa do Arroz	297	1994-2022
Carrapateira	387	1996-2022
Catingueira	297	1994-2022
Conceição	387	1994-2022
Coremas	256	1994-2022
Curral Velho	345	1996-2022
Diamante	308	1996-2022
Emas	271	1994-2022
Ibiara	347	1994-2022
Igaracy	310	1995-2022
Itaporanga	287	1994-2022
Fazenda Veludo	309	2004-2022
Juru	726	1994-2022
Manaíra	765	1994-2022
Marizópolis	301	2001-2022
Monte Horebe	753	1996-2022
Nazarezinho	274	1994-2022
Nova Olinda	320	1994-2022
Olho D'Água	269	1994-2022
Pedra Branca	296	1996-2022
Piancó	261	1994-2022
Princesa Isabel	686	1994-2022
Santa Helena	292	1996-2022
Santa Inês	411	2005-2022
Santana de Mangueira	374	1994-2022
Santana dos Garrotes	325	1994-2022
Serra Grande	598	1994-2022
São João do Rio do Peixe	248	1994-2022
São José da Lagoa Tapada	262	1994-2022
São José de Caiana	619	1996-2022
São José de Piranhas	336	1994-2022
São José de Princesa	723	2005-2022
Sousa	237	1994-2022
São Gonçalo	236	1994-2022
Tavares	733	1996-2022

Autoria própria, 2022

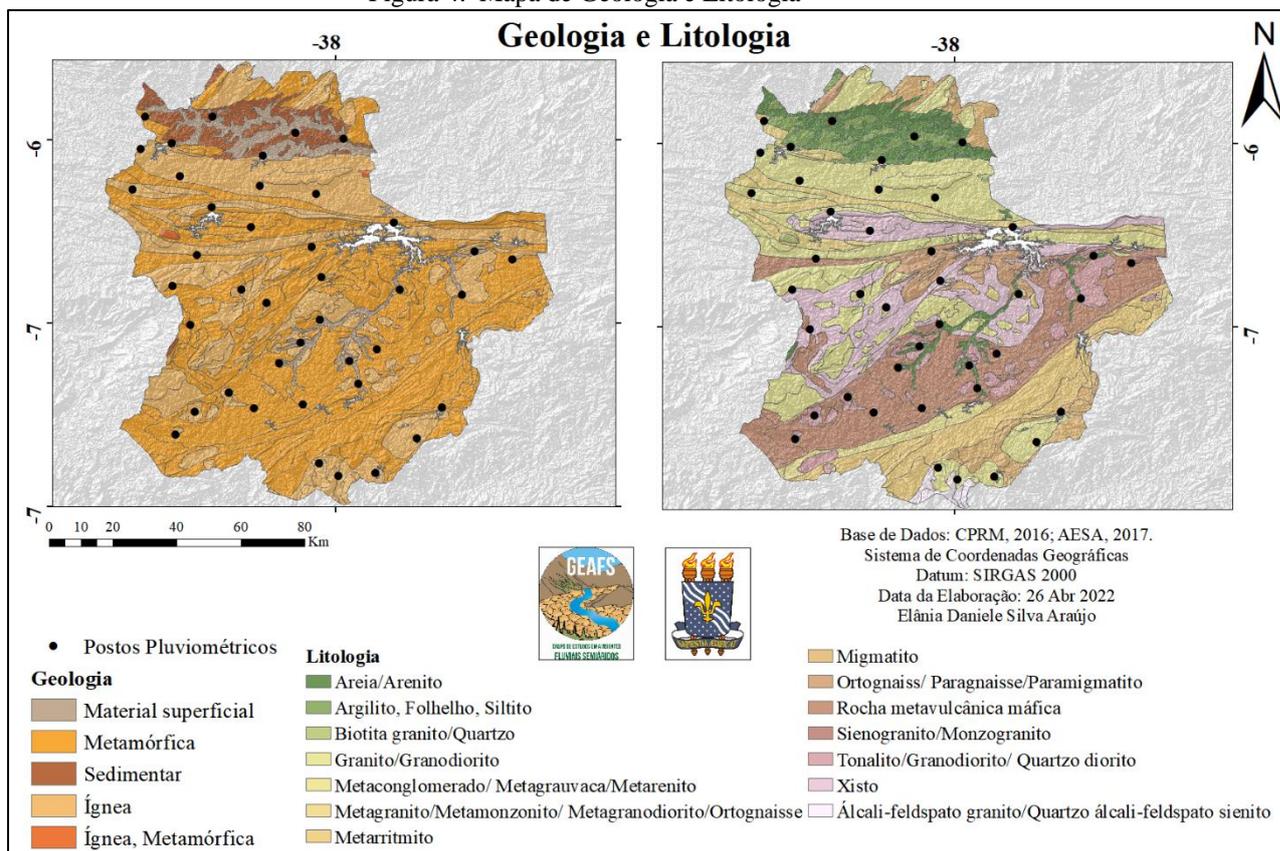
2.1.1. Caracterização Geoambiental

A discussão da estrutura da paisagem é possível a partir da análise integrada dos seus componentes. É a análise conjunta dos elementos que permite o entendimento do

sistema de evolução da paisagem. A Geologia e o clima apresentam uma influência direta sobre os demais componentes Geoambientais da paisagem, sendo a vegetação o reflexo dessas condições.

O Alto Sertão paraibano está inserido numa área composta principalmente por rochas metamórficas e ígneas, datadas do Pré-cambriano, mais especificamente há cerca de 2,5 bilhões de anos no período Paleoproterozóico, podendo ser encontrado também em sua porção noroeste rochas sedimentares que fazem parte da bacia sedimentar do Rio do Peixe. Em sua composição litológica, é possível encontrar na maior parte da área granito e granodiorito, além de formação ferrífera, mármore, depósitos aluviais (areia, silte, argila) e outras litologias em menores proporções (Figura 4).

Figura 4. Mapa de Geologia e Litologia

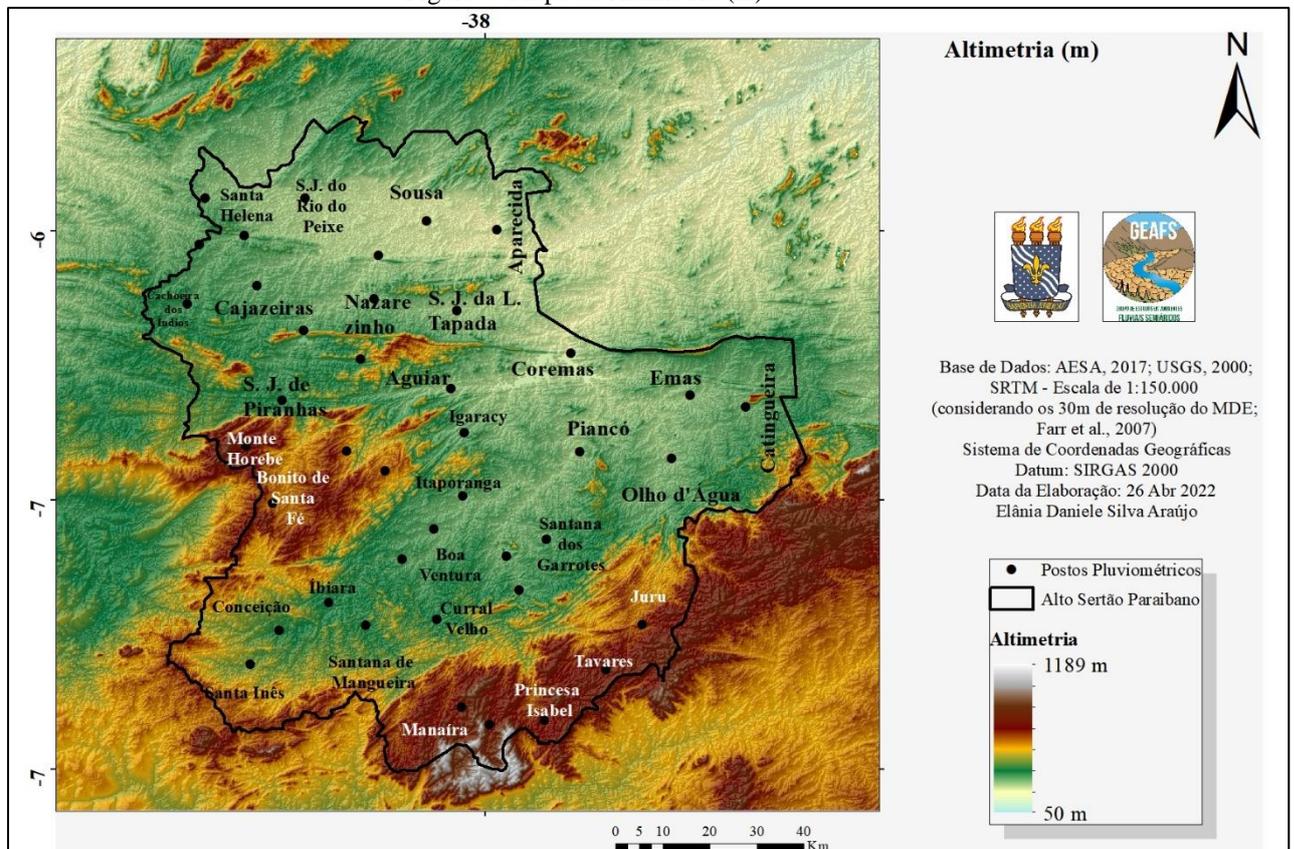


Autoria própria, 2022

A geomorfologia do Alto Sertão paraibano pode ser considerada diversificada, podendo ser encontradas desde planícies fluviais até áreas escarpadas, caracterizando-o com uma variação hipsométrica entre 194 e 1158m (Figuras 5 e 6). É o clima semiárido que, por um lado, a partir de seus respectivos processos que dará resposta a dissecação do relevo, expondo a estrutura por meio da erosão diferencial, possibilitando, em parte, a

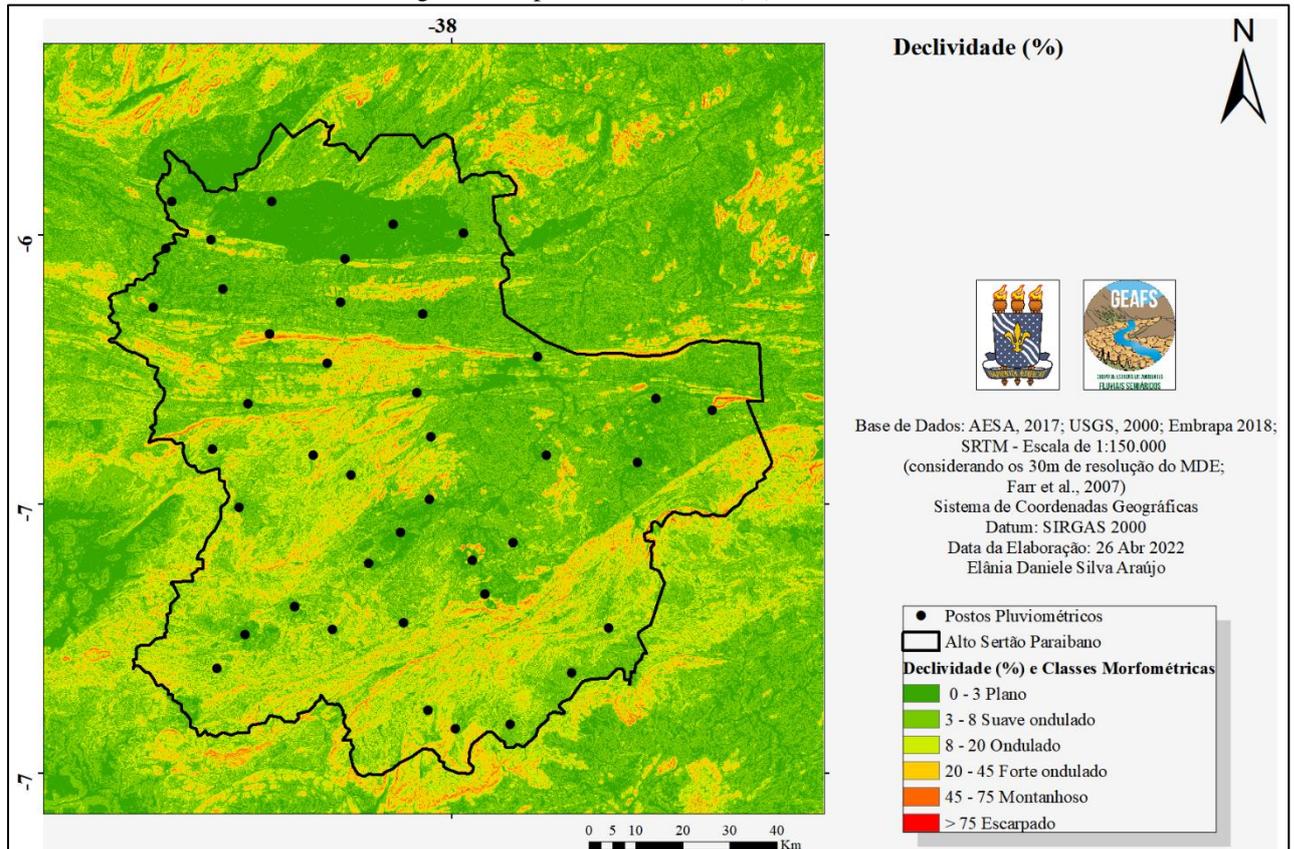
formação de um alinhamento de crista, ou seja, uma intersecção entre o plano das vertentes, constituída por uma linha de cota maior, a partir da qual irão divergir os dois declives das vertentes e na maioria da área o aplainamento. Por outro lado, o relevo age como um sistema de microescala que funciona como barreira orográfica, promovendo uma variabilidade no microclima local, onde a barlavento se encontram as áreas mais úmidas, enquanto a sotavento estarão áreas mais secas.

Figura 5. Mapa de Altimetria (m)



Autoria própria, 2022

Figura 6. Mapa de Declividade (%)



Autoria própria, 2022

É possível identificar uma área plana marcada pelas Planícies fluviais ou fluviolacustres, ao longo do curso do rio Piancó e do rio Piranhas. São constituídas de depósitos areno-argilosos a argilo-arenosos, apresentando gradientes plano a suave ondulado e convergentes em direção aos cursos d'água principais, as áreas de planícies apresentam as menores altitudes da área. Aqui predominam os Argissolos Vermelhos, esses possuem altos teores de ferro presentes no material originário, justamente por estarem próximos a ambientes bem drenados. Apresenta uma fertilidade natural bastante variável devido à diversidade dos materiais de origem. Além das áreas de planícies fluviais, outras partes da área de estudo apresentam relevo plano, variando entre 0% e 3%.

A maior parte da área é considerada a paisagem típica do Sertão (SÁ *et al.*, 2004), conhecida como depressão sertaneja apresenta uma declividade entre 3-8%, esse tipo de relevo é caracterizado por pedimentos. Superfícies suavemente onduladas, proveniente do arrasamento geral dos terrenos e em seguida a retomada erosiva proporcionada pela incisão suave da rede de drenagem incipiente, é conhecido também por integrar o contexto das depressões interplanálticas do território brasileiro.

Nessa área, predominam os Luvisolos Crômicos Órticos e os Vertissolos, ambos se caracterizam por apresentarem material argiloso, o primeiro apresenta em sua composição, material mineral, um horizonte B textural com argila de atividade alta e alta saturação por bases, imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A (com exceção do chernozêmico), ou sob horizonte E, já o último, apresenta uma restrição temporária à percolação de água, sendo composto por mais de 30% de argila ao longo do seu perfil, são solos poucos permeáveis e acabam por restringir a drenagem.

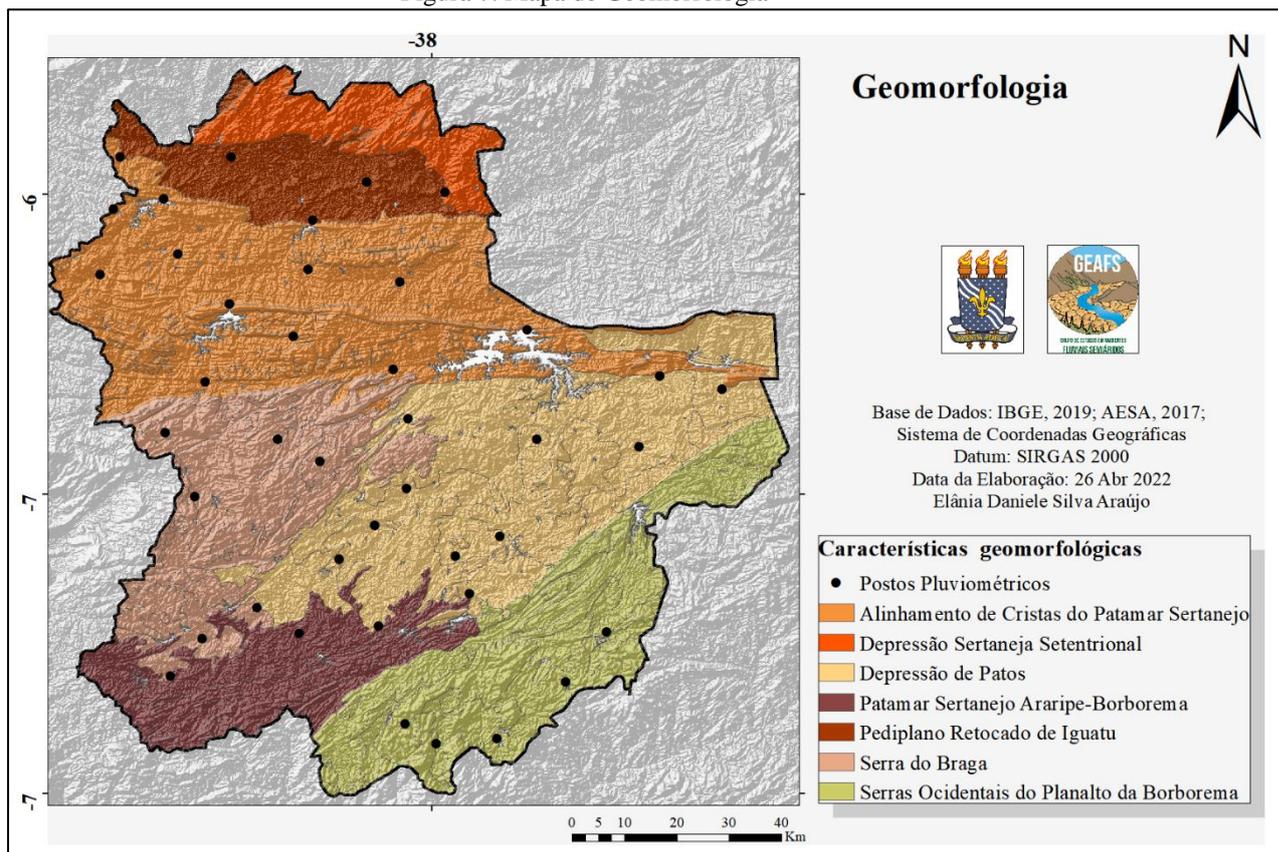
As classes de relevo ondulado (8-20%) e forte ondulado (20-45%) também são encontradas no Alto Sertão paraibano, dispostos principalmente na parte Sul e Oeste. O primeiro apresenta vertentes convexo-côncavas e topos arredondados ou aguçados, classificado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), como Patamar Sertanejo Araripe-Borborema. Essa feição é de grande importância, pois compõe um sistema de drenagem principal com deposição de planícies aluviais restritas ou em vales fechados. O último, é caracterizado por um relevo de morros convexo-côncavos dissecados e topos arredondados ou aguçados, classificado como Serra do Braga e Serras Ocidentais do Planalto da Borborema, também pode integrar um sistema de drenagem principal com restritas planícies aluviais.

Nessas áreas predominam os Neossolos Litólicos, que, por conseguinte, esse tipo de solo se caracteriza por ser pouco evoluído e constituído por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20cm de espessura, desse modo, não apresenta qualquer tipo de horizonte B diagnóstico, podendo em alguns casos, ser encontrado um horizonte B em início de formação. São Solos com horizonte A diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr, ou ainda sob material com mais de 90% de fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2mm (cascalhos, calhaus e matacões).

Os Inselbergs também fazem parte da geomorfologia do Alto Sertão com uma declividade entre 45-75%, definidos como relevos residuais isolados destacados na paisagem aplainada, restantes do arrasamento geral dos terrenos. Na parte central da área em estudo é possível identificar um alinhamento de Crista do Patamar Sertanejo (>75%), chamado também de Escarpas Serranas, identificado como o Complexo de Serras das Águas Sertanejas (PESAS) sua característica é de um relevo montanhoso, muito acidentado. Suas Vertentes são predominantemente retílineas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados, com sedimentação de colúvios e depósitos de tálus. O sistema de drenagem principal se encontra em franco

processo de entalhamento nesse tipo de forma (MACHADO, 2012; ARAÚJO, 2018). A Geomorfologia da área está ilustrada na Figura 7.

Figura 7. Mapa de Geomorfologia



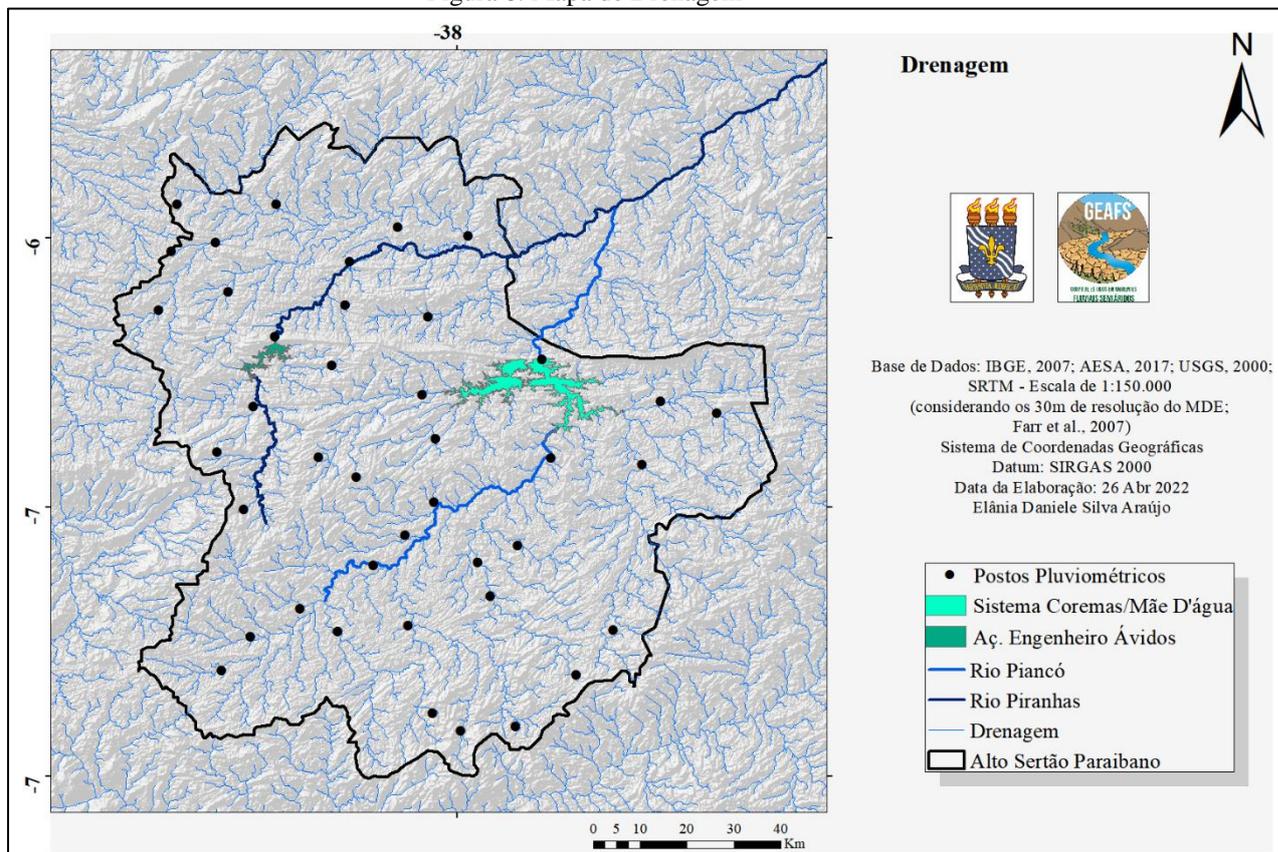
Autoria própria, 2022

A drenagem da área é palco de importantes bacias hidrográficas como a bacia do rio Piranhas-açu localizada entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte e de sub-bacias como a do rio Piancó e do Alto piranhas, essas estão totalmente inseridas em território paraibano. É uma área drenagem dentrítica constituída por dois rios principais o Piranhas e o Piancó (Figura 8), além de ser palco das nascentes de outros diversos riachos, a exemplo dos riachos do Olho D'água, Vazante e Miguel (AESA, 2010; ARAÚJO, 2018).

O complexo de serras existente na área, se configura como um divisor de águas dos rios e riachos que desaguam na bacia do rio Piranhas e que possuem suas nascentes ali, os rios e riachos da área possuem um caráter intermitente, contendo água apenas no período chuvoso, característica típica do clima semiárido. Outra característica que marca a hidrografia da área é a existência do sistema Coremas-Mãe D'Água construído no rio Piancó, um dos principais afluentes do rio Piranhas, esse reservatório é o maior do estado, possui capacidade de acúmulo de 1,4 bilhões de m³ e tem significativa importância para a

região e para o estado em geral. Além desse, encontra-se na área outro reservatório de considerável porte, o Engenheiro Ávidos, que barra o rio Piranhas e localiza-se no município de Cajazeiras (AESAs, 2010; SOUSA, 2011; ARAÚJO, 2018).

Figura 8. Mapa de Drenagem



Autoria própria, 2022

O Alto Sertão paraibano, possui um clima semiárido de sete a oito meses secos e está inserido no norte do Nordeste. A variação altimétrica e de relevo existentes na área possibilita um regime diferenciado de precipitação, com uma variação média desde 710,9 e podendo chegar a alcançar 1.097mm (Figura 9), alguns municípios se destacam com pluviosidade média acima de 800mm o que caracteriza uma particularidade dentro do semiárido que tem uma precipitação média de até 800mm/ano. Araújo *et al.* (2017) afirmam que a região do Vale do Piancó pode ser considerada a área com as maiores precipitações no Alto Sertão, porém, ao gerar o mapa de precipitação, com os dados de 1994 até 2021, é possível perceber que as maiores precipitações podem ser observadas nos municípios de São João do Rio do Peixe, Cajazeiras, Sousa, Aguiar, Marizópolis, São José da Lagoa Tapada, Nazarezinho, São José de Piranhas, Bom Jesus e Santa Helena. Associado à precipitação, destacam-se uma maior umidade e temperaturas mais amenas. A

precipitação está distribuída na quadra chuvosa entre fevereiro e maio, com maiores registros no mês de março e as temperaturas médias variam entre 24° e 27°C.

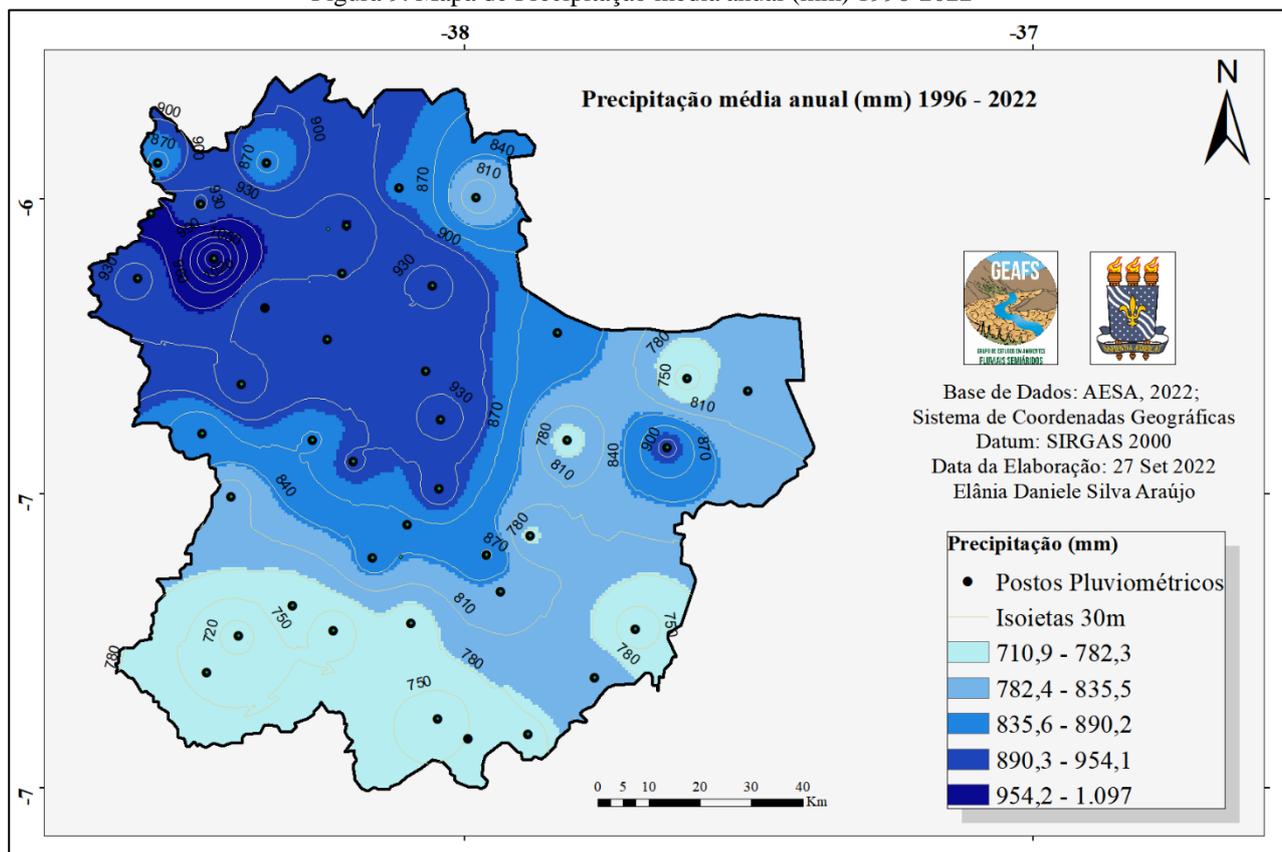
Em macroescala, essas precipitações estão intimamente ligadas a atuação da ZCIT, que se origina pela confluência dos ventos alísios de SE e NE e atua entre os meses de fevereiro e abril, trazendo chuvas abundantes para toda região. A ZCIT varia sua posição média de 14°N entre agosto e setembro e 2°S, com atuação máxima de fevereiro a maio, período em que ela atua proporcionando o regime de chuva no SAB (ARAÚJO *et al.*, 2017).

A ZCIT está relacionada diretamente com as anomalias de temperatura de superfície (ATS) e com a Temperatura Superficial do Mar (TSM), sendo a segunda determinante para o seu posicionamento e sua intensidade, se localizando onde a TSM está mais elevada. Quando as águas do Atlântico Norte estão mais quentes que no Atlântico Sul, teremos uma estiagem no SAB, do contrário, quando a ZCIT é posicionada no Atlântico Sul e suas águas estão com temperatura mais elevada, haverá o período de precipitação para o SAB, conseqüentemente para o Alto Sertão da Paraíba (MOLION e BERNARDO, 2002; ARAÚJO *et al.*, 2017).

Em mesoescala atuam os Vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), caracterizados por serem um conjunto de nuvens em formato de círculo, girando em sentido horário. Em seu centro os movimentos de ar são subsidente, dessa forma, ocorre o aumento da pressão e a inibição das chuvas, já em sua periferia, o ar que está em ascensão proporciona a formação de nuvens e a precipitação. Outros sistemas atuantes ainda são os Complexos Convectivos (CCM's) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs).

Em microescala, é o relevo que atuará em expressividade, isso porque ele é configurado como uma barreira orográfica para as massas de ar que intensificam a atividade de convecção, extraíndo mais umidade, ascendendo o ar sobre as altitudes elevadas e resfriando-o, o resultado é a formação das nuvens estratiformes. Assim, a umidade condensa na encosta a barlavento com ascensão de ar tépido e úmido, enquanto a sotavento o ar é descendente ocasionando evaporação, tornando-o o ar quente e seco (CHRISTOPHERSON, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2017).

Figura 9. Mapa de Precipitação média anual (mm) 1996-2022



Autoria própria, 2022

2.2. Metodologia

Esta pesquisa tem como base as abordagens teóricas contemporâneas sobre as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas. No Brasil, a vegetação de Caatinga é classificada como uma FTSS, essa vegetação expressa uma relação intrínseca com o clima quente e seco da região, bem como com as chuvas irregulares típicas do semiárido brasileiro, a qual responderá ora de maneira instantânea, ora de maneira delongada a precipitação, de acordo com suas espécies e os arranjos naturais locais.

Serão produzidos dados a partir do Sensoriamento Remoto, bem como, análise dos dados de precipitação e dos dados estatísticos, visando um melhor entendimento das especificidades da dinâmica e da correlação entre os índices de vegetação e a precipitação. Entre as possibilidades de utilização de procedimentos técnicos, pode-se citar o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) para analisar o comportamento desses arranjos vegetais e sua variação.

2.2.1. Mapeamento Temático

O mapeamento temático tem a finalidade de espacializar as informações ambientais e integrá-las, para que dessa maneira, seja possível entender o comportamento do ambiente. Foram elaborados mapas de geologia e litologia, hipsometria, declividade, mapa geomorfológico, precipitação e drenagem. Os dados geológicos foram provenientes da base de dados do mapeamento de geodiversidade da Paraíba no Geobank – CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e geomorfológicos da base de dados do IBGE. Quanto aos dados meteorológicos são oriundos do banco de dados da Agência Executiva de Gestão das Águas do estado da Paraíba (AES/A) e referentes à precipitação diária entre os anos de 1994 e 2022.

Os dados para as estimativas obtidas através das técnicas de SR foram oriundos do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado para o mapeamento foi o da Missão Topográfica Radar Shuttle - SRTM que apresenta resolução espacial de 30m, essa resolução espacial permite uma análise mais detalhada, se comparada ao SRTM de 90m. Os produtos são referentes a localização 07S38ZN, 07S39ZN, 08S38ZN e 08S39ZN para abarcar toda a área, foi feito um mosaico das quatro imagens. A partir do SRTM foram geradas a declividade em porcentagem (%), de acordo com a classificação da EMBRAPA (2018), a hipsometria e a drenagem. As últimas foram geradas de forma automática. Os mapas de precipitação foram gerados a

partir de interpolação e em seguida foram geradas as isoietas de 30m, a partir do interpolador *Inverse Distance Weighted - IDW*.

2.2.2. Análise exploratória para escolha dos pontos

Para a escolha das áreas a serem estudadas, foram observados alguns critérios: o primeiro deles é que fossem próximos aos postos pluviométricos, assim, tomou-se como base o posto e em sua volta foi traçado um *buffer* de 5km de raio, o que equivale a 78,5km² de área. Optou-se pelo raio de 5km, para que a precipitação seja representativa, mas principalmente devido as chuvas localizadas, uma especificidade da área em estudo devido a variação de altitude. Inicialmente, as análises seriam feitas tomando como base os 43 postos pluviométricos, porém, ao ser traçado o raio de 5km, dois deles ficaram muito próximos um do outro, sobrepostos, de modo a haver uma área de intersecção muito grande entre eles. Desse modo, esses dois *buffers* foram excluídos (Boa Ventura e Marizópolis) e as análises seguiram sendo feitas com 41 restantes.

Dentro desse raio de 5km, baseado nos dados da coleção 7 do Mapbiomas, foram identificadas as manchas de vegetação. Sendo assim, trabalhou-se apenas com os dados que foram classificados como Formação Savânica pelo Mapbiomas, para que as análises fossem feitas apenas com os pixels que fossem referentes a vegetação.

O segundo critério é que essas áreas estivessem distribuídas em áreas de terrenos geológicos cristalinos e sedimentares, para diagnosticarmos se há uma diferença na resposta espectral desses arranjos e na correlação com a precipitação.

O último critério foi que estivessem em altitudes variadas, para que seja constatada a influência que a altitude, a declividade e a geomorfologia podem exercer na análise, permitindo corroborar com a interação que existe na paisagem. Assim, foram visitados 41 pontos que fossem representativos dos 41 *buffers* escolhidos dentro da área de estudo.

2.2.3. Extração dos dados Geológico-geomorfológicos para os *buffers*

Os dados referentes a litologia, altitude, declividade e Índice Topográfico de Umidade - ITU, foram extraídos dos mesmos produtos descritos e utilizados no mapeamento temático. Após traçar o raio de 5km para cada *buffer*, foram extraídas as médias de cada um desses produtos, assim, os dados analisados foram as médias de litologia, altitude, declividade e ITU para cada *buffer*.

2.2.4. Índice topográfico de Umidade (ITU)

O índice Topográfico de Umidade -ITU (Topographic Wetness Index - TWI), tem relação com a umidade do solo e com a sua capacidade de escoamento, pois, os perfis com maior umidade estão mais susceptíveis de se tornarem saturados (HARDY, 2010; ROA LOBO e ULRICH, 2012). Esse índice foi desenvolvido pela primeira vez por Beven e Kirkby (1979) e pode ser calculado a partir da seguinte fórmula (Equação 1):

$$\ln = (\alpha / \tan\beta) \quad (1)$$

onde, \ln é o logaritmo neperiano, α é a área acumulada (m^2) e a $\tan\beta$ é a declividade do terreno (radiano).

Assim, esse modelo expressa, parcialmente o volume relativo e a quantidade de movimento do fluxo que passa por cada ponto do solo. Valores mais altos do ITU indicam uma maior umidade naquele ponto, com base na configuração topográfica. Quando há uma inclinação maior, a concentração de umidade na área diminui, resultando em solos menos encharcados. Por outro lado, áreas com valores elevados de ITU representam zonas de concentração de água. A precisão desse índice está diretamente relacionada à precisão da escala utilizada para gerar o modelo digital de elevação (ALCANTARA-AYALA, 2000; ROA e ULRICH, 2012).

2.2.5. Análise do comportamento da vegetação

A análise da vegetação foi feita a partir da utilização do IVDN (ROUSE *et al.* 1973). A avaliação visa detalhar o comportamento inter e intra-anual dessas coberturas, especialmente no início do período chuvoso e durante esse, bem como avaliar a velocidade de perda de folhas durante os meses secos do ano, em anos considerados secos, habituais e chuvosos, nosso foco está na análise da sazonalidade da vegetação, não sendo o objetivo classificá-la.

As pesquisas desenvolvidas no semiárido brasileiro, em sua maioria utilizam o IVAS, devido seu fator de correção ao efeito de *background* do solo. Esse índice já foi citado por diversos autores como o mais eficaz para a vegetação de Caatinga (SILVA e GALVÍNIO 2012; SANTOS *et al.* 2015; AZEVEDO e ALVES 2015; RIBEIRO *et al.*,2016), devido ao fato dessa vegetação perder as folhas no período seco e o solo interferir no seu processo de reflectância. Embora, para a área em estudo foi feito um comparativo entre o IVDN e o IVAS e foi constatado que ambos respondem satisfatoriamente a representação da vegetação local (ARAÚJO, MACHADO e SOUZA, 2019). Desse modo, para essa

pesquisa será utilizado o IVDN, visto que, na literatura internacional, as análises de vegetação sazonalmente secas são, em sua maioria, realizadas com esse índice.

Foram escolhidas todas as imagens disponíveis sem cobertura de nuvens para a área de estudo entre os anos de 1994 e 2022, totalizando 88 imagens dos satélites Landsat 5 (*Thematic Mapper -TM*), 7 (*Enhanced Thematic Mapper – ETM+*), 8 (*Operational Land Imager - OLI*) e 9 (*OLI-2*), de órbita 216 e ponto 65. A resolução espacial para todos eles é de 30m e a temporal de 16 dias (Tabela 3).

Tabela 3. Datas e Satélite/Sensor das imagens utilizadas

Data da imagem	Satélite/Sensor	Data da imagem	Satélite/Sensor
07/08/1994	Landsat 5 – TM	23/09/2011	Landsat 5 – TM
27/09/1995	Landsat 5 – TM	24/06/2013	Landsat 8 – OLI
29/10/1995	Landsat 5 – TM	12/09/2013	Landsat 8 – OLI
25/06/1996	Landsat 5 – TM	26/05/2014	Landsat 8 – OLI
11/07/1996	Landsat 5 – TM	27/04/2015	Landsat 8 – OLI
29/09/1996	Landsat 5 – TM	04/10/2015	Landsat 8 – OLI
15/10/1996	Landsat 5 – TM	05/11/2015	Landsat 8 – OLI
25/07/1997	Landsat 5 – TM	21/11/2015	Landsat 8 – OLI
14/07/1997	Landsat 5 – TM	07/12/2015	Landsat 8 – OLI
02/10/1997	Landsat 5 – TM	15/05/2016	Landsat 8 – OLI
03/11/1997	Landsat 5 – TM	03/08/2016	Landsat 8 – OLI
19/09/1998	Landsat 5 – TM	20/09/2016	Landsat 8 – OLI
22/11/1998	Landsat 5 – TM	06/10/2016	Landsat 8 – OLI
04/07/1999	Landsat 5 – TM	07/11/2016	Landsat 8 – OLI
24/10/1999	Landsat 5 – TM	23/11/2016	Landsat 8 – OLI
13/08/1999	Landsat 7 – ETM+	06/08/2017	Landsat 8 – OLI
24/09/2000	Landsat 7 – ETM+	26/11/2017	Landsat 8 – OLI
15/08/2000	Landsat 7 – ETM+	22/06/2018	Landsat 8 – OLI
02/10/2000	Landsat 7 – ETM+	09/08/2018	Landsat 8 – OLI
05/12/2000	Landsat 7 – ETM+	25/08/2018	Landsat 8 – OLI
18/08/2001	Landsat 7 – ETM+	26/09/2018	Landsat 8 – OLI
05/10/2001	Landsat 7 – ETM+	28/10/2018	Landsat 8 – OLI
20/07/2002	Landsat 7 – ETM+	13/11/2018	Landsat 8 – OLI
22/09/2002	Landsat 7 – ETM+	29/11/2018	Landsat 8 – OLI
12/01/2003	Landsat 5 – TM	15/12/2018	Landsat 8 – OLI
15/07/2003	Landsat 5 – TM	22/04/2019	Landsat 8 – OLI
31/07/2003	Landsat 5 – TM	13/09/2019	Landsat 8 – OLI
20/11/2003	Landsat 5 – TM	16/11/2019	Landsat 8 – OLI

06/12/2003	Landsat 5 – TM	02/12/2019	Landsat 8 – OLI
22/12/2003	Landsat 5 – TM	13/07/2020	Landsat 8 – OLI
07/01/2004	Landsat 5 – TM	14/08/2020	Landsat 8 – OLI
01/07/2004	Landsat 5 – TM	17/10/2020	Landsat 8 – OLI
24/12/2004	Landsat 5 – TM	18/11/2020	Landsat 8 – OLI
06/09/2005	Landsat 5 – TM	06/02/2021	Landsat 8 – OLI
24/10/2005	Landsat 5 – TM	04/10/2021	Landsat 8 – OLI
28/01/2006	Landsat 5 – TM	21/11/2021	Landsat 8 – OLI
25/09/2006	Landsat 5 – TM	25/06/2022	Landsat 9 – OLI-2
28/11/2006	Landsat 5 – TM	12/08/2022	Landsat 9 – OLI-2
26/07/2007	Landsat 5 – TM	20/08/2022	Landsat 8 – OLI
28/09/2007	Landsat 5 – TM	05/09/2022	Landsat 8 – OLI
01/11/2008	Landsat 5 – TM	21/09/2022	Landsat 8 – OLI
01/09/2009	Landsat 5 – TM	29/09/2022	Landsat 9 – OLI-2
03/10/2009	Landsat 5 – TM	31/10/2022	Landsat 9 – OLI-2
20/11/2009	Landsat 5 – TM	10/12/2022	Landsat 8 – OLI

Autoria própria, 2023

Em seguida, foram feitos o pré-processamento, o processamento, o recorte da área e gerado o IVDN, que pode ser obtido por meio da razão entre a diferença das refletividades das bandas do Infravermelho próximo (ρ_{iv}) e do vermelho (ρ_v), pela soma das mesmas, de acordo com a seguinte fórmula descrita por Rouse *et al.* (1973) (Equação 2):

$$IVDN = (\rho_{iv} - \rho_v) / (\rho_{iv} + \rho_v) \quad (2)$$

De cada *buffer* foi extraída a amplitude, a média, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos de IVDN, para as 88 imagens. Além disso, foi gerada uma imagem representativa com a espacialização da média de todas as imagens, levando em consideração a área de vegetação contida em cada *buffer*, a partir da classificação do Mapbiomas. O percentual de vegetação contido em cada *buffer* foi estimado a partir da quantificação dos *pixels* e convertidos para o cálculo de área.

2.2.6. Análise da precipitação

O primeiro passo foi adquirir o banco de dados junto a AESA, nele constam as precipitações diárias e mensais para os 41 postos pluviométricos escolhidos, referente aos anos de 1994 a 2022, identificou-se algumas falhas nos dados, a maioria dos postos pluviométricos tinham a série completa, outros tinham a partir de 1996 e três postos específicos, tinham dados a partir de 2005. Optou-se por não excluir as áreas com falhas,

por serem importante para as análises devido as suas condições geológico-geomorfológicas particulares, então, os dados foram reorganizados da seguinte maneira: para ilustrar a pluviosidade média de todo Alto Sertão, utilizou-se a série de 1996 a 2022. Para a análise espacial e da variabilidade da precipitação e identificação do comportamento das chuvas nos *buffers*, utilizou-se os dados entre 2005 e 2022 assim, todas as áreas tiveram o mesmo período de análise. Por fim, para as correlações, utilizou-se toda a série, desde 1994 até 2022, respeitando a disponibilidade dos dados de precipitação para cada *buffer*. Desse modo, em seguida, procedeu-se a tabulação dos dados no *software Excel*, para chegar as médias, valores máximos e mínimos anuais e as demais análises.

2.2.6.1. Análise dos Acumulados de precipitação antes do imageamento por satélite

Foi feita a separação e a análise dos dados para que fosse efetuada a correlação com a vegetação. Desse modo, foram analisados os dados de precipitação, calculados e tabulados em *Excel*, a partir das funções de soma e concatenação, assim foi possível chegar aos acumulados de chuva 30, 60, 90, 120, 180 e 365 (AVIAD *et al.*, 2009) antes do imageamento por satélite. A análise da precipitação é imprescindível pois as FTSS, respondem a eventos de chuva em diferentes velocidades e taxas, muitas vezes de forma rápida. Dependendo da precipitação antecedente, uma mesma área de FTSS pode variar o seu valor de IVDN desde 0,2 o que a classificaria como savana ou vegetação esparsa, até 0,6 resposta de floresta tropical, em alguns locais esse valor pode chegar a 0,8 (OMUTO *et al.*, 2010; SOUZA, 2019; SOUZA e HOOKE, 2021).

2.2.6.2. Análise dos Dias de Chuva

A existência da precipitação influencia no comportamento da vegetação com o ganho de folhas, mas a ausência dela também influencia em seu ciclo fenológico, fazendo com que ela vá perdendo suas folhas em uma das formas de adaptação. Por isso, é importante analisar o número de dia de chuva e sem chuva para o entender esse comportamento. Assim, foi feita uma análise da média do Número de dias de Chuva (NDC) e do Número de dias de Chuva Efetiva (NDCE), utilizou-se como limiar para determinação da chuva efetiva o parâmetro de 10mm (SOUZA, 2014), bem como, do Número de dias Consecutivos Sem Chuva (NDCSC) e do Número de dias Consecutivos Sem Chuva Efetiva

(NDCSCE). Todos os procedimentos foram feitos no *software Microsoft Excel* a partir da função Cont.se.

2.2.6.3. Identificação dos anos Secos, Chuvosos e Habituais

A classificação dos anos foi possível a partir da aplicação do Índice de Precipitação Padronizada (*Standardized Precipitation Index - SPI*), esse índice foi proposto por MCKEE, DOESKEN e KLEIST (1993) e baseia-se em uma função de densidade gama para a descrição das séries temporais, podendo ser calculado em diversas escalas de tempo. A precipitação é o único parâmetro de entrada para o seu cálculo, assim esse índice é eficaz tanto na análise de períodos úmidos, quanto secos (SVOBODA, HAYES e WOOD, 2012; LIU, *et al.*, 2021). Sua variação vai de 2 (para períodos muito úmidos) a -2 (períodos de extrema seca) (Tabela 4).

Tabela 4. Classes do Índice de Precipitação Padronizado (SPI)

Classificação	Valores de SPI
Extremamente chuvoso	$\geq 2,00$
Muito chuvoso	1,00 – 1,99
Moderadamente chuvoso	0,50 – 0,99
Próximo ao normal	0,49 – -0,49
Moderadamente seco	-0,50 – -0,99
Muito seco	-1,00 – -1,99
Extremamente seco	$\leq -2,00$

Fonte: Mckee, Doesken e Kleist (1993), adaptado.

Primeiramente a função de densidade de probabilidade gama incompleta é ajustada a uma dada distribuição de frequência de séries de precipitação (Equação 3):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x > 0 \quad (3)$$

onde α é um parâmetro sobre forma, β é um parâmetro sobre escala, x é a quantidade de precipitação e a função gama é apresentada na Equação 4 como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4)$$

Os valores de α e β são estimados pelo método da máxima verossimilhança (Equação 5; Equação 6 e Equação 7:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = \bar{x}\hat{\alpha} \quad (6)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (7)$$

onde n é o número de séries de precipitação.

Em seguida, obtêm-se a probabilidade acumulada para um determinado mês, pela seguinte Equação 8:

$$G(x) = \int_g^x a \cdot t^{a-1} e^{-\frac{2}{B}t} dt \quad (8)$$

Por fim, o SPI pode ser calculado da seguinte forma (Equação 9 e Equação 10):

$$SPI(t) = S \frac{t - (c_2 t + c_{10}) + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(G(x))^2} \right)} \quad (10)$$

onde x é a quantidade de precipitação e G(x) é a distribuição de probabilidade de precipitação relacionada à função Γ , S é o coeficiente positivo e negativo da distribuição de probabilidade acumulativa, assim, quando $G(x) > 0,5$, $S = 1$ e quando $G(x) \leq 0,5$, $S = -1$. $c_0 = 2,5155$, $c_1 = 0,8028$, $c_2 = 0,0103$, $d_1 = 1,4327$, $d_2 = 0,1892$, $d_3 = 0,0013$.

Para tanto, utilizou-se o *Drought Index and Monitoring System*, esse programa foi desenvolvido em ambiente MS-Excel e linguagem *Visual Basic for Applications*, por Blain, Rolim e Brunini, (2005). Além do cálculo do SPI, o programa fornece também as médias aritméticas e geométricas da precipitação pluvial, parâmetros alfa e beta e probabilidades cumulativas de ocorrência de um valor de chuva observado em escalas de tempo.

2.2.7. Análises Estatísticas

2.2.7.1. Análise de Clustering

A análise de *Clustering* é uma das abordagens da estatística multivariada e tem como objetivo agrupar os dados de acordo com as semelhanças existente entre eles, a partir de pelo menos três variáveis numéricas (PEDROSO e RODRÍGUEZ-ARTACHO, 2013; SAMMOUDA *et al.*, 2021; RACOUTE *et al.*, 2022). Para que seja feita a análise de

clustering é necessário a escolha de um algoritmo que possa efetuar o agrupamento. Para essa pesquisa foram testados três algoritmos: o *Spatial clustering based on application density with noise - DBSCAN*, o Método hierárquico e o *K-means*.

O *DBSCAN* é um dos algoritmos baseados em densidade mais amplamente utilizados. Nele os objetos da vizinhança serão os sujeitos para determinar a densidade, e a distância entre eles é limitada por um parâmetro de limite especificado. Uma vantagem desse algoritmo é reconhecer automaticamente o número mais apropriado de clusters e detectar valores discrepantes, porém, ele requer dois parâmetros (Eps e MinPts) que ajudam a definir como o algoritmo identifica os *clusters* e pontos de ruído no espaço de dados. O *DBSCAN* necessita de grandes quantidades de memória para processamento dos dados e não se configura como adequado para manipular dados que tenham alta dimensionalidade e com densidades díspares (LIMWATTANAPIBOOL e ARCH-INT, 2017; CHEN, *et al.*, 2019; SCITOVSKI e SABO, 2021; LI *et al.*, 2023 LI *et al.*, 2023).

O método hierárquico constrói uma árvore de clusters, chamada de dendrograma, representando a classificação de agrupamento. Nesse método existem as abordagens aglomerativas (começam com cada ponto sendo um cluster e mesclam clusters até um único cluster) e as divisivas (começam com todos os pontos em um único cluster e dividem até que cada ponto seja um cluster separado). Ele é útil quando a estrutura hierárquica dos dados é relevante. Pode ser aplicado em análise de genealogia, classificação taxonômica, entre outros (MASIERO *et al.*, 2013; INEKWE, MAHARAJ e BHATTACHARYA, 2020).

O *K-means* foi o algoritmo que melhor representou a estrutura dos dados e forneceu melhores agrupamentos para essa pesquisa, sendo assim escolhido para efetuar a análise de *clustering*. Ele é considerado particional, ou seja, que divide o conjunto de dados em K clusters, onde K é um número pré-definido. É um dos algoritmos não supervisionados mais comuns e eficazes na análise de *clustering*. Tem um bom efeito de agrupamento e uma de suas vantagens é a simplicidade de implementação, além disso nenhum conjunto de treinamento é necessário (CHEN, *et al.*, 2019; SAMMOUDA e EL-ZAART, 2021; RACOLTE *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2023).

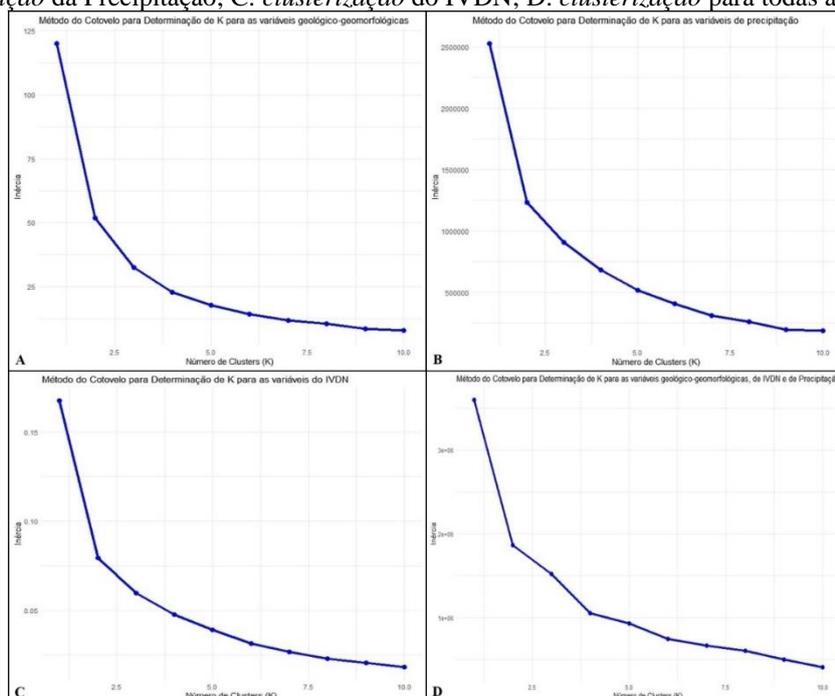
As principais etapas do algoritmo de agrupamento k-means são: criação de k centroides (k é o número de *clusters* que serão criados, assim, cada ponto é atribuído ao centroide mais próximo. Em seguida, o centroide é recalculado. Este processo é repetido várias vezes até que o resultado da alocação de pontos de dados no cluster não mude mais.

Embora a implementação do *K-means* seja relativamente simples, esse algoritmo requer uma escolha do valor de k (o número de cluster a ser criado) predefinida, o que

requer muita atenção, pois, uma vez que essa escolha é arbitrária ou inadequada, pode gerar agrupamentos que não refletem a verdadeira estrutura dos dados, tornando a interpretação dos resultados desafiadora e podendo levar a implicações incorretas sobre os padrões nos dados. Por isso, existem alguns métodos e métricas estatísticas para a escolha ideal do número de k. Dentre eles, destacamos o método do cotovelo (*Elbow*) e a métrica da silhueta (SAMMOUDA e EL-ZAART, 2021; RACOLTE *et al.*, 2022), que foram utilizados nessa pesquisa para ajudar na definição do número de k.

O método do cotovelo, se baseia na ideia de que, à medida que o número de clusters aumenta, a variabilidade *intra-cluster* diminui, o que resulta em uma diminuição das distâncias médias entre os pontos de dados e seus respectivos centros de *cluster*. No entanto, em algum momento, adicionar mais *clusters* deixará de resultar em uma redução significativa na variabilidade *intra-cluster*, e isso é onde o "cotovelo" é identificado no gráfico de variabilidade em relação a diferentes valores de k. Ao efetuar tal método, foram encontrados valores ideais de k=6 (*clusterização* geológico-geomorfológica e de IVDN), k=8 (*clusterização* de Precipitação), k=4 (*clusterização* para todas as variáveis juntas) (Figura 10: A, B, C e D).

Figura 10. Método do Cotovelo para escolha de K para: A. *clusterização* Geológico-geomorfológica. B. *clusterização* da Precipitação; C. *clusterização* do IVDN; D. *clusterização* para todas as variáveis



Autoria própria, 2023

Para a *clusterização* geológico-geomorfológica foram usadas as variáveis de Altitude, Declividade, Índice Topográfico de Umidade (ITU) e a litologia, todos os valores referentes a média de cada *buffer*. Para a *clusterização* de precipitação, as variáveis

utilizadas foram os valores máximos, médios, mínimos anuais, os valores de SPI e a média do NDC, NDCE, NDCSC e NDCSCE. Para os *clusters* de vegetação, as variáveis foram amplitude, média, valores máximos e mínimos e Desvio Padrão do IVDN. Por fim, para a *clusterização* conjunta, foram utilizadas a Altitude, Declividade, ITU, litologia, médias e amplitudes do IVDN, as médias, mínimos e máximos de precipitação anual e as médias do NDC, NDCE, NDCSC e NDCSCE.

2.2.7.2. Correlação estatística entre os dados de Vegetação e Precipitação

Primeiramente foram feitas as correlações para o entendimento do grau de relação entre as duas variáveis, utilizou-se o método de Pearson (Equação 11). O coeficiente de correlação pode variar de -1 a +1. Quanto maior for o valor absoluto do coeficiente, mais forte é a relação entre as variáveis (Tabela 5). Um valor absoluto de 1 indica uma relação linear perfeita, se for mais próxima de 0 indicará que não há relação linear entre as variáveis (ROGERSON, 2012).

$$r = \frac{\sum_i(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i(x_i - \bar{x})^2 \sum_i(y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

Tabela 5. Classificação da correlação de Pearson

Coefficiente de Correlação (r)	Classificação
-1	Perfeita Negativa
-0,6 a -0,9	Forte Negativa
-0,6 a -0,3	Regular negativa
-0,3 a -0,1	Fraca negativa
0	Nula
0 a 0,3	Fraca positiva
0,3 a 0,6	Regular positiva
0,6 a 0,9	Forte positiva
1	Perfeita positiva

Fonte: Callegari-Jacques (2009), adaptado

Gerou-se então as correlações entre os acumulados de chuva e os valores do IVDN e os gráficos de dispersão para cada *buffer*, no *software* estatístico R, avaliou-se também a melhor correlação para cada área.

Em seguida foi efetuada a regressão, que pode ser definida como o estudo do comportamento de uma variável dependente, em função da variação de uma ou mais

variáveis independentes, assim, supõe-se que estas variáveis estão numa relação de causa e efeito. A relação funcional entre as variáveis implica na possibilidade de estimar o valor de uma variável, dado o valor da outra, de acordo a função matemática que apresente melhor aderência aos dados observados (ROGERSON, 2012). Aqui foi utilizada a regressão linear simples (Equação 121).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (12)$$

Para prosseguir com a regressão, foi feita a divisão entre o banco de dados, utilizando o pacote *rsample* e decidido manter 25% dos dados totais para o banco de teste e 75% para treinamento. A *clusterização* serviu de base para efetuar a regressão para os diferentes agrupamentos que foram obtidos. Assim, procedeu-se a regressão entre os dados de IVDN e Acumulado de Precipitação que melhor apresentou correlação para cada *buffer*. Todas as análises estatísticas e todos os gráficos foram feitos no *software* estatístico R.

2.2.8. Trabalho de campo

Foram efetuadas três idas a campo. A primeira com o objetivo de realizar um contato inicial com a área, identificar as primeiras informações e efetuar uma possível escolha dos pontos, essa ocorreu nos dias 18 e 19 de julho de 2022 com o objetivo de identificar os grupos vegetacionais, não houve ida a campo antes desse período, devido a Pandemia do SARS-CoV-2, iniciada em março de 2020, mesmo período em que se iniciou o referido curso de doutorado.

A segunda visita ocorreu entre os dias 03 e 05 de novembro de 2022. A partir das observações, fechou-se a metodologia da escolha das áreas, na qual, optou-se em tomar como base o *buffer* com raio de 5km do posto pluviométrico e a partir dos dados do Mapbiomas trabalhar apenas com a classe de vegetação dentro daquele raio. A escolha de 5km de raio do posto, deu-se em razão das precipitações localizadas característica do clima semiárido, muitas vezes em função da altitude e geomorfologia da área. Sabendo que a precipitação é uma variável crucial para o entendimento do comportamento da vegetação das FTSS, optou-se pela escolha de áreas que pudessem ter precipitações representativas para a área.

A terceira, aconteceu entre os dias 14 e 18 de novembro de 2023 e teve como objetivo validar os dados estimados por sensor, entender as respostas das correlações e das demais estimativas estatísticas, além de efetuar os registros fotográficos das áreas que ainda não tinham sido visitadas.

CAPÍTULO III



RESULTADOS

3.1. Descrição dos *Buffers* Analisados

O Alto Sertão paraibano apresenta uma diversidade paisagística, onde é possível localizar áreas de planícies, depressões e escarpas serranas, bem como, uma variação altimétrica, de declividade e em sua litologia. Essas características aliadas ao clima local e a disponibilidade de umidade proporcionará a existência de diversos arranjos vegetacionais. Entender o comportamento desses arranjos se torna de suma importância, especialmente por sua relação com os demais elementos da paisagem. Para tanto, foram traçadas algumas análises e relações entre a vegetação e as demais variáveis nas 41 áreas escolhidas.

Cada *buffer* possui uma área total de 78,5km², aproximadamente, dessa área foram calculadas as médias de IVDN, de precipitação anual, altitude, litologia, declividade, ITU, índices e acumulados de precipitação e a correlação desses com o índice de vegetação. Dezesesseis *buffers* apresentaram mais de 70% da área composta por vegetação e nove apresentaram menos de 40% (Tabela 6). Os *buffers* serão apresentados nos mapas, tabelas e ao longo do texto pelo número de identificação (ID), para facilitar o entendimento da espacialização de cada um.

Tabela 6. Características dos *buffers* escolhidos

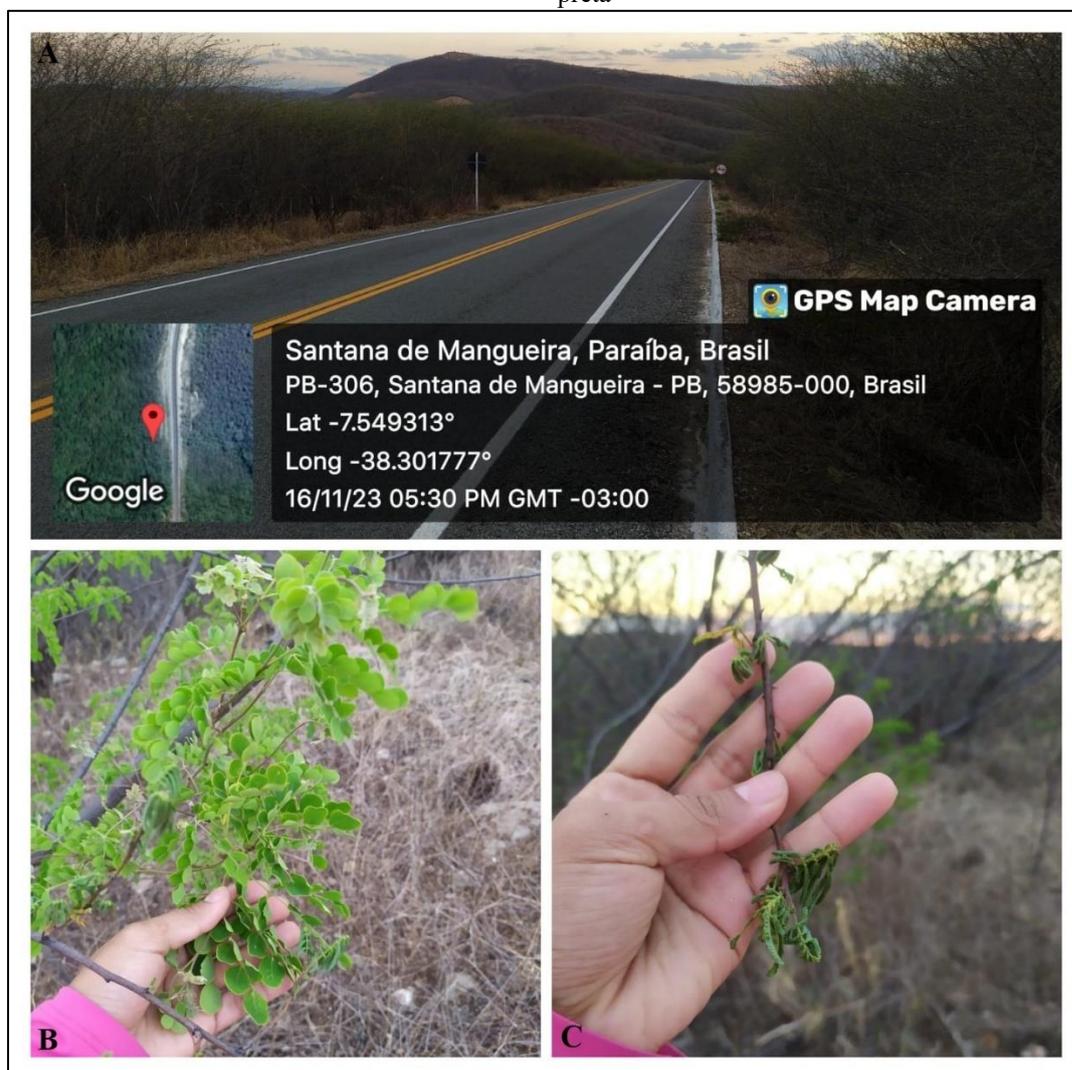
ID do <i>Buffer</i>	Localidade	Média IVDN (1994-2022)	Área de vegetação do <i>Buffer</i> (Km ²)	% de vegetação em cada <i>Buffer</i>	Média de precipitação anual (1996-2022, mm)	Altitude (m)	Litologia
1	Aguiar	0.369	60.11	76.57	927	309	Complexos metamagmáticos
2	Aparecida	0.346	44.72	56.96	811.4	226	Areia/Arenito
3	Bom Jesus	0.366	43.46	55.36	979.9	314	Complexos granitoides
4	Bonito de Santa Fé	0.362	51.58	65.71	828.4	634	Complexos metassedimentares
5	Cachoeira dos Índios	0.381	49.39	62.92	889.3	343	Complexos granitoides
6	Cajazeiras	0.365	35.20	44.84	986.4	307	Complexos granitoides
7	Aç. Eng. Ávidos	0.402	57.49	73.23	926.95	350	Complexos granitoides
8	Aç. Lagoa do Arroz	0.372	47.96	61.09	847.6	310	Complexos granitoides
9	Carrapateira	0.375	65.19	83.04	923.6	448	Complexos metassedimentares
10	Catingueira	0.332	62.79	79.98	771.9	331	Complexos metassedimentares
11	Conceição	0.335	53.70	68.41	738	405	Complexos metassedimentares
12	Coremas	0.363	32.56	41.48	877	244	Complexos granitoides
13	Curral Velho	0.349	70.14	89.35	747.6	379	Complexos metassedimentares

14	Diamante	0.358	62.41	79.50	826.8	332	Complexos metassedimentares
15	Emas	0.324	54.77	69.76	714.6	285	Complexos granitoides
16	Ibiara	0.341	64.59	82.28	772.2	384	Complexos metassedimentares
17	Igaracy	0.355	45.91	58.48	866.25	325	Complexos metassedimentares
18	Itaporanga	0.353	45.17	57.54	941.6	319	Complexos metassedimentares
19	Fazenda Veludo	0.357	35.43	45.14	875.7	309	Complexos metassedimentares
20	Juru	0.335	54.39	69.28	715.9	657	Complexos granitoides
21	Manaíra	0.352	55.28	70.42	695.8	760	Complexos granitoides
22	Monte Horebe	0.392	62.99	80.25	837.6	708	Complexos granitoides
23	Nazarezinho	0.367	55.31	70.46	929.7	299	Complexos granitoides
24	Nova Olinda	0.339	50.22	63.97	853.9	353	Complexos metassedimentares
25	Olho D'Água	0.326	57.66	73.45	914.4	284	Complexos granitoides
26	Pedra Branca	0.340	43.35	55.22	886.9	314	Complexos metassedimentares
27	Piancó	0.334	47.33	60.30	775.8	292	Complexos metassedimentares
28	Princesa Isabel	0.367	45.05	57.38	763.8	691	Complexos granitoides
29	Santa Helena	0.351	28.71	36.57	865.1	300	Areia/Arenito
30	Santa Inês	0.337	69.41	88.42	787.7	461	Complexos metassedimentares
31	Santana de Mangueira	0.343	71.53	91.12	745	390	Complexos metassedimentares
32	Santana dos Garrotes	0.320	58.01	73.90	816.6	321	Complexos metassedimentares
33	Serra Grande	0.377	67.64	86.17	864.7	579	Complexos metassedimentares
34	S. J. do Rio do Peixe	0.344	24.31	30.97	833.2	259	Areia/Arenito
35	S. J. da L. Tapada	0.354	50.65	64.52	994.3	282	Complexos granitoides
36	S. J. de Caiana	0.382	67.12	85.50	882.4	585	Complexos metassedimentares
37	S. J. de Piranhas	0.351	38.88	49.53	900	387	Complexos granitoides
38	S. J. de Princesa	0.391	54.91	69.95	761.4	821	Complexos granitoides
39	Sousa	0.331	30.58	38.96	871.2	226	Areia/Arenito
40	São Gonçalo	0.351	39.78	50.67	910.6	252	Areia/Arenito
41	Tavares	0.359	33.35	42.48	797.7	729	Complexos granitoides

Autoria própria, 2023

Dos dezesseis *buffers* com mais de 70% da área composta por vegetação, destaca-se o *buffer* ID31, com 91,12%, equivalente a 71,53km², apesar da alta porcentagem da área coberta por vegetação, sua média de IVDN foi de 0,343, não estando dentro dos maiores valores encontrados, além disso, o ponto visitado não apresentou uma diversidade de espécies, foi possível identificar espécies como a *Caesalpinia pyramidalis* Tul (Catingueira), *Mimosa tenuiflora* (Jurema-preta) e *Croton sonderianus* (Marmeleiro). A baixa variedade de espécies é característica de áreas que sofreram algum tipo de degradação e estão se regenerando, geralmente são áreas em que a mata está jovem, é perceptível também no tamanho e espessura dos arbustos. Sua média de precipitação anual é de 745mm, sua altitude média é de 309m e está dentro do complexo metassedimentar (Figura 11).

Figura 11. A. Vegetação no *buffer* ID31 no período seco; B. Espécie de Catingueira; C. Espécie de Jurema-preta



Araújo, 2023

O segundo *buffer* com maior quantidade de área de vegetação foi o ID13 (Figura 12A), com 89,35% da área, o que equivale a 70,14km². Sua média de IVDN foi classificada como média e de precipitação foi baixa, sendo 0,349 e 747,3, respectivamente. Sua altitude média é de 379m e sua litologia é classificada como complexo metassedimentar. Apesar de apresentar a segunda maior área em vegetação, essa é uma área degradada, foi possível encontrar corte (Figura 12B) e queima da vegetação (Figura 12C), também não foi encontrada uma diversidade de espécies na área, sendo predominante jurema-preta e catingueira, além de *Prosopis juliflora* (Algaroba) que não é uma árvore nativa, mas que é encontrada em grande quantidade no semiárido. Embora essa árvore seja utilizada para múltiplos fins, pela população local, ela causa alguns impactos tanto na estrutura quanto na diversidade e na composição florística da vegetação nativa, visto que, a capacidade de competição dessa árvore em busca de água afeta a regeneração, estabelecimento e a colonização das espécies nativas (PEGADO *et al.*, 2006).

Figura 12. A. Vegetação no *buffer* ID13 no período seco; B. Árvores cortadas; C. Área queimada



Araújo, 2023

Outro *buffer* que se destacou quanto a maior área de vegetação foi o ID30, que tem cerca de 69,41km², correspondente a 88,42% do total. Assim como os *buffers* descritos anteriormente, a vegetação encontrada na área não apresenta uma diversidade de espécies, sendo predominante as espécies já descritas nos *buffers* anteriores. Esse apresentou uma média de IVDN e precipitação baixas de 0,337 e 787,5mm, respectivamente. A altitude média dessa área é de 461m e a declividade é de 9,20%, também está dentro do complexo metassedimentar (Figura 13 A, B e C).

Figura 13 A, B e C. Vegetação no *buffer* ID30 no período seco

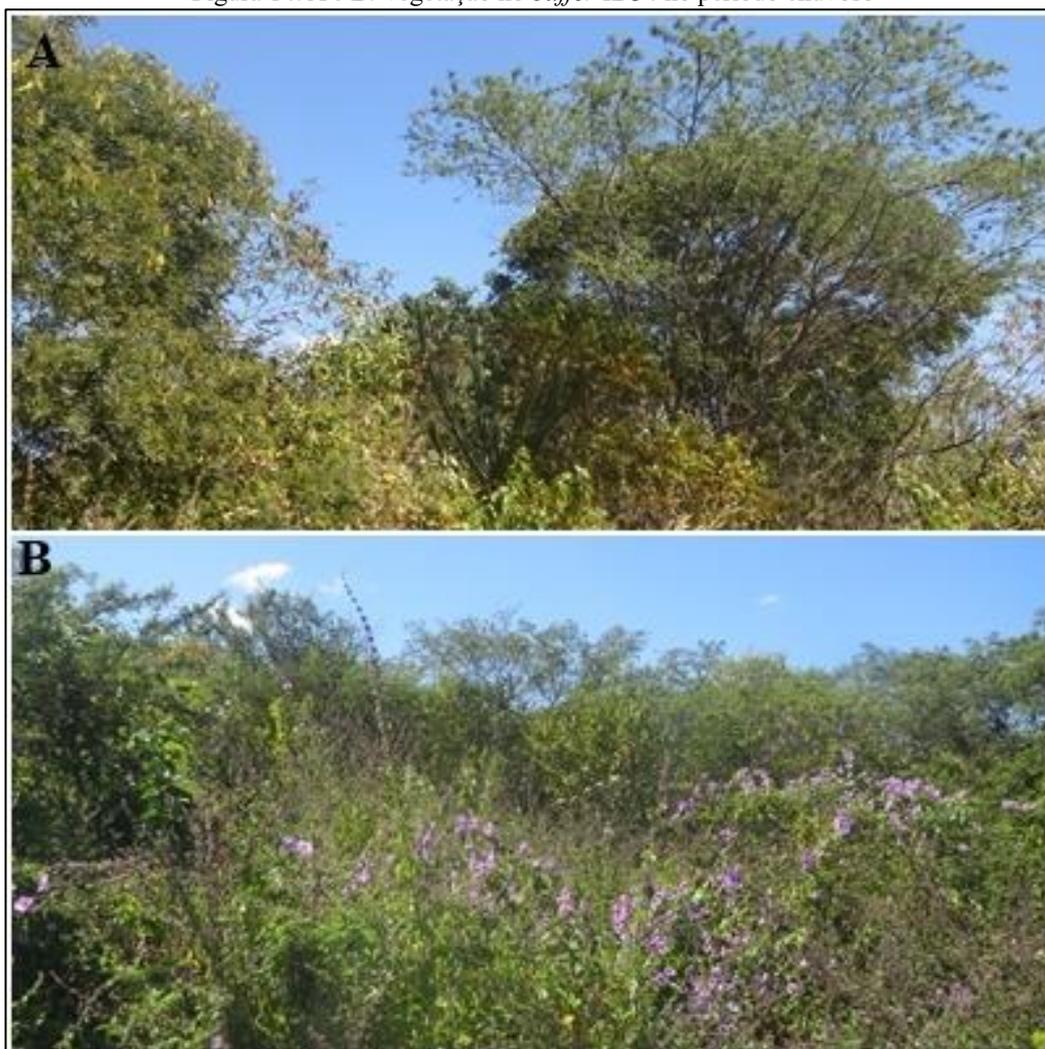


Araújo, 2023

Dos *buffers* com menores áreas de vegetação, destacam-se o de ID34 com 30,97%, e 24,31km², sua média de IVDN é 0,344, a média de precipitação anual é 833,2mm, a

altitude é de 259m e está dentro da classificação de arenitos. Nessa área foram observadas espécies como jurema, marmeleiro, catingueira e algaroba (Figura 14 A e B).

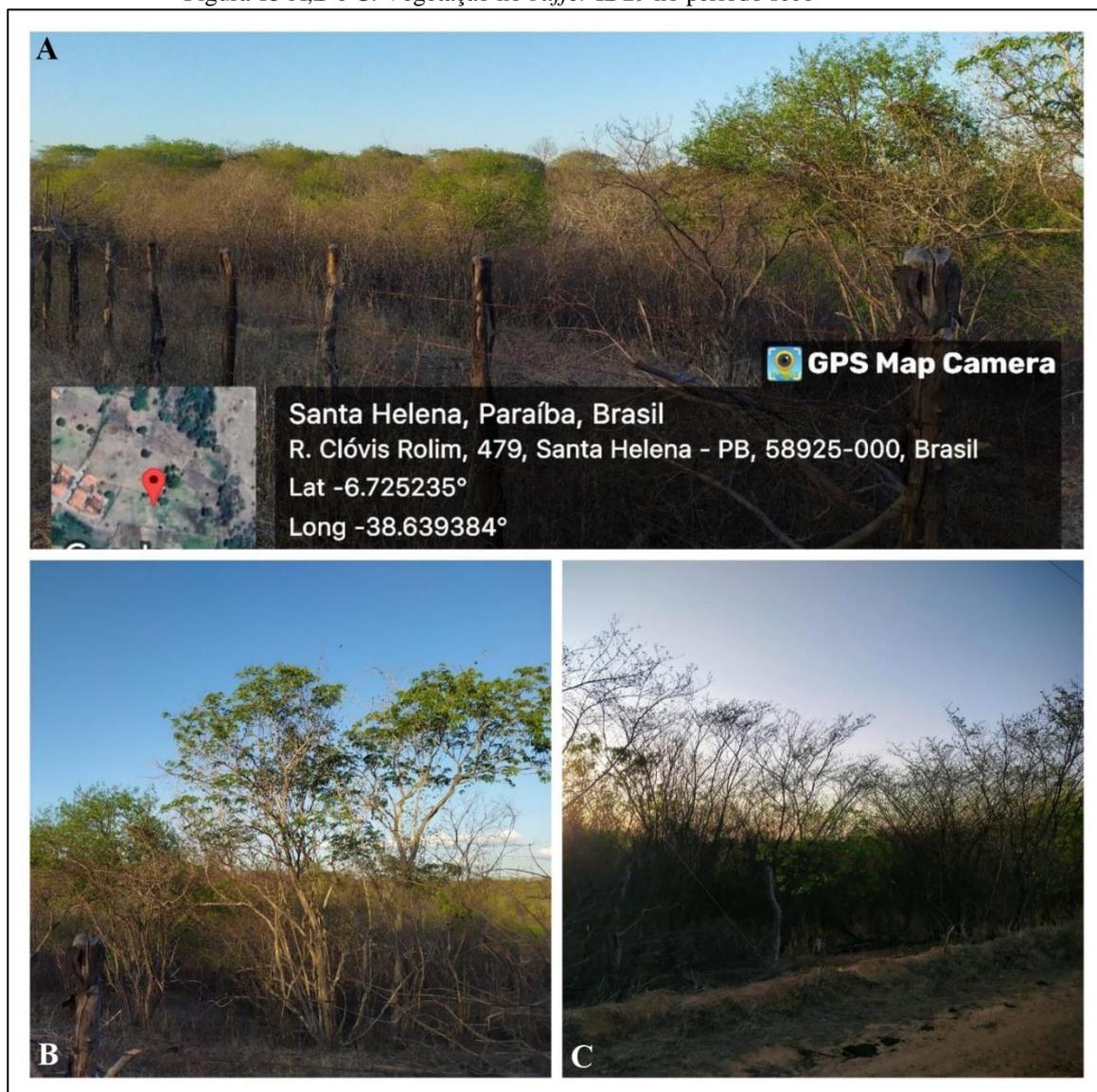
Figura 14. A e B. Vegetação no *buffer* ID34 no período chuvoso



Araújo, 2022

O *buffer* ID29 também apresentou uma das menores áreas dentre os *buffers*, com 28,78km², a vegetação recobre apenas 36,57% da área total. Sua média de IVDN foi de 0,351, a precipitação média foi de 865,1mm, sua altitude é de 300m e está classificado como arenito (Figura 15 A, B e C).

Figura 15 A,B e C. Vegetação no *buffer* ID29 no período seco



Araújo, 2023

Outro *buffer* que apresentou menos de 40% da cobertura vegetal foi o ID39 (Figura 16A), com 38,96% da área, cerca de 32,57km². Seu IVDN médio foi de 0,331, sua precipitação média foi de 871,2mm, está entre as maiores observadas, sua altitude média é de 226m, também é uma área de Arenito. Esse *buffer* apresentou uma área bem degradada, sem diversidade de espécies, com muita jurema-preta (Figura 16B) e marmeleiro (Figura 16C).

Figura 16. A. Vegetação no *buffer* ID39 no período seco; B. Espécies de Jurema-preta; C. Espécies de Marmeleiro



Araújo, 2022

Foi possível identificar que parte das áreas sedimentares e com as maiores médias de precipitação, apresentaram espécies que se mantêm verde e com folhas mesmo estando no período seco. As maiores médias de precipitação contribuem para uma maior umidade na área, a litologia sedimentar permite que haja uma maior capacidade de retenção de água no solo mantendo a umidade por mais tempo. Já e as áreas que estão mais próximas das serras, que por sua vez apresentam altitudes e declividades maiores apresentam uma diversidade maior da vegetação. As áreas de serras, devido a altitude e declividade dificultam o acesso ao uso da terra, por isso não há um elevado grau de degradação nessas áreas, além disso, são áreas de nascentes, que também contribuem para manter a umidade

e a vegetação com folhas até mesmo no período seco, e por fim, existe precipitação no topo das serras que por estarem distante, não são registradas nos postos pluviométricos. Todos esses fatores combinados permitem a existência dessa condição da vegetação.

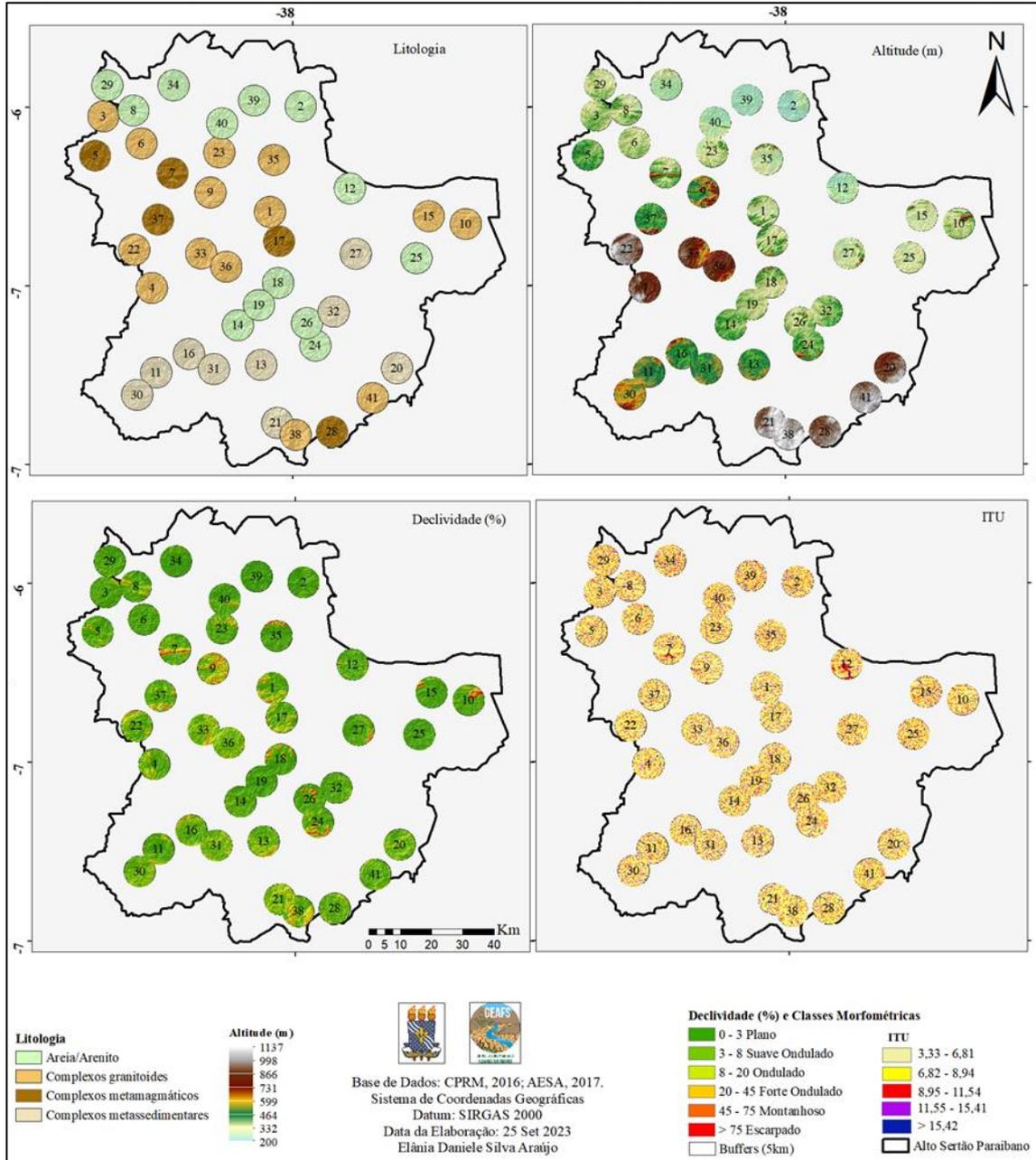
Enquanto as áreas que apresentam uma média de precipitação mais baixa e que estão em altitude e declividades menores, apresentam uma vegetação com um nível elevado de degradação e são áreas onde as espécies estão mais secas e com um grau de perda de folhas mais elevado, o que é comum para a vegetação de Caatinga no período seco. O acesso a essas áreas possibilitam diferentes usos para esses ambientes, bem como, diferentes formas de degradação, como a queima e a substituição da vegetação por agricultura, pecuária e o corte para a retirada de lenha.

3.2. Caracterização Geológico-Geomorfológica

Para uma melhor compreensão da litologia dos *buffers*, suas respectivas áreas foram agrupadas em quatro tipos: areia/arenito, complexos granitoides, complexos metassedimentares e complexos metamagmáticos. Assim, 17 *buffers* foram classificadas como complexos granitoides, 5 como areia/arenitos, 18 como complexos metassedimentares e 1 como complexos metamagmáticos, ou seja, rochas metamórficas de origem magmáticas. O entendimento do tipo de litologia é primordial para a identificação da capacidade de retenção de umidade no solo e por sua vez do comportamento da vegetação. As altitudes médias dos *buffers* variaram entre 226 e 821m, já as declividades foram de 1,24 até 17,23%. Para todos eles, as médias de ITU foram em torno de 6,0. Cada *buffer* está representado no mapa por um número de identificação de 1 a 41, para facilitar o entendimento da espacialização de cada um.

Os 5 *buffers* com a presença de areia/arenito, apresentam baixas altitudes, a maior dentro dessa classe, foi o ID29, com 300 metros, isso ocorre, pois, essas áreas estão inseridas dentro da bacia sedimentar do Rio do Peixe. As declividades, em média, também foram baixas (Tabela 7; Figura 17). Para todas as áreas, nessa classificação, as médias de ITU foram as maiores, sendo o ID39 a maior média 6,93. Isso ocorre porque as áreas com um declive menor, proporcionam uma maior acumulação de água e conseqüentemente de umidade para o ambiente, do contrário, as áreas de maiores declives não acumulam água, fazendo com que a umidade ali seja menor.

Figura 17. Litologia, Altitude (m), Declividade (%) e Índice Topográfico de Umidade (ITU) dos buffers



Autoria própria, 2023

Tabela 7. Características geológico-geomorfológicas dos *buffers*

ID	Litologia	Altitude (m)	Declividade (%)	ITU
1	Complexos metamagnéticos	309	10,14	6.33
2	Areia/Arenito	226	2,78	6.81
3	Complexos granitoides	314	4,14	6.49
4	Complexos metassedimentares	634	7,95	6.31
5	Complexos granitoides	343	5,63	6.51
6	Complexos granitoides	307	3,16	6.63
7	Complexos granitoides	350	11,68	6.45
8	Complexos granitoides	310	7,15	6.45
9	Complexos metassedimentares	448	17,23	5.93
10	Complexos metassedimentares	331	8,76	6.47
11	Complexos metassedimentares	405	6,00	6.55
12	Complexos granitoides	244	4,56	6.87
13	Complexos metassedimentares	379	9,96	6.26
14	Complexos metassedimentares	332	4,85	6.59
15	Complexos granitoides	285	4,30	6.70
16	Complexos metassedimentares	384	8,25	6.44
17	Complexos metassedimentares	325	9,32	6.30
18	Complexos metassedimentares	319	7,06	6.52
19	Complexos metassedimentares	309	2,74	6.82
20	Complexos granitoides	657	8,25	6.34
21	Complexos granitoides	760	12,10	6.15
22	Complexos granitoides	708	9,49	6.28
23	Complexos granitoides	299	6,27	6.40
24	Complexos metassedimentares	353	10,06	6.38
25	Complexos granitoides	284	2,56	6.72
26	Complexos metassedimentares	314	6,90	6.56
27	Complexos metassedimentares	292	5,98	6.52
28	Complexos granitoides	691	7,36	6.35
29	Areia/Arenito	300	3,43	6.53
30	Complexos metassedimentares	461	9,20	6.26
31	Complexos metassedimentares	390	9,58	6.27
32	Complexos metassedimentares	321	4,69	6.49
33	Complexos metassedimentares	579	12,06	6.12
34	Areia/Arenito	259	2,18	6.82
35	Complexos granitoides	282	5,94	6.53
36	Complexos metassedimentares	585	10,13	6.10
37	Complexos granitoides	387	8,94	6.40
38	Complexos granitoides	821	13,55	6.20
39	Areia/Arenito	226	1,24	6.93
40	Areia/Arenito	252	3,64	6.73
41	Complexos granitoides	729	6,28	6.32

Autoria própria, 2023

Os 17 *buffers* que estão dentro do complexo granitoide apresentaram altitudes e declividades variadas. As maiores altitudes são nos ID38 (821m), ID21 (760m), ID41 (729m) e ID22 (708m), dessas a maior declividade foi a do 38 (13,55%). A menor altitude e declividade desse grupo foi a do *buffer* de ID23, de 299m e 2,56%, respectivamente, proporcionando assim, o maior ITU dentre as áreas desse grupo litológico, de 6,72. Foi

possível encontrar afloramentos de rochas graníticas em algumas dessas áreas classificadas nessa litologia (Figura 18).

Figura 18. A. Afloramentos de rochas no ID28. B e C. Afloramento de rochas no ID41



Araújo, 2023

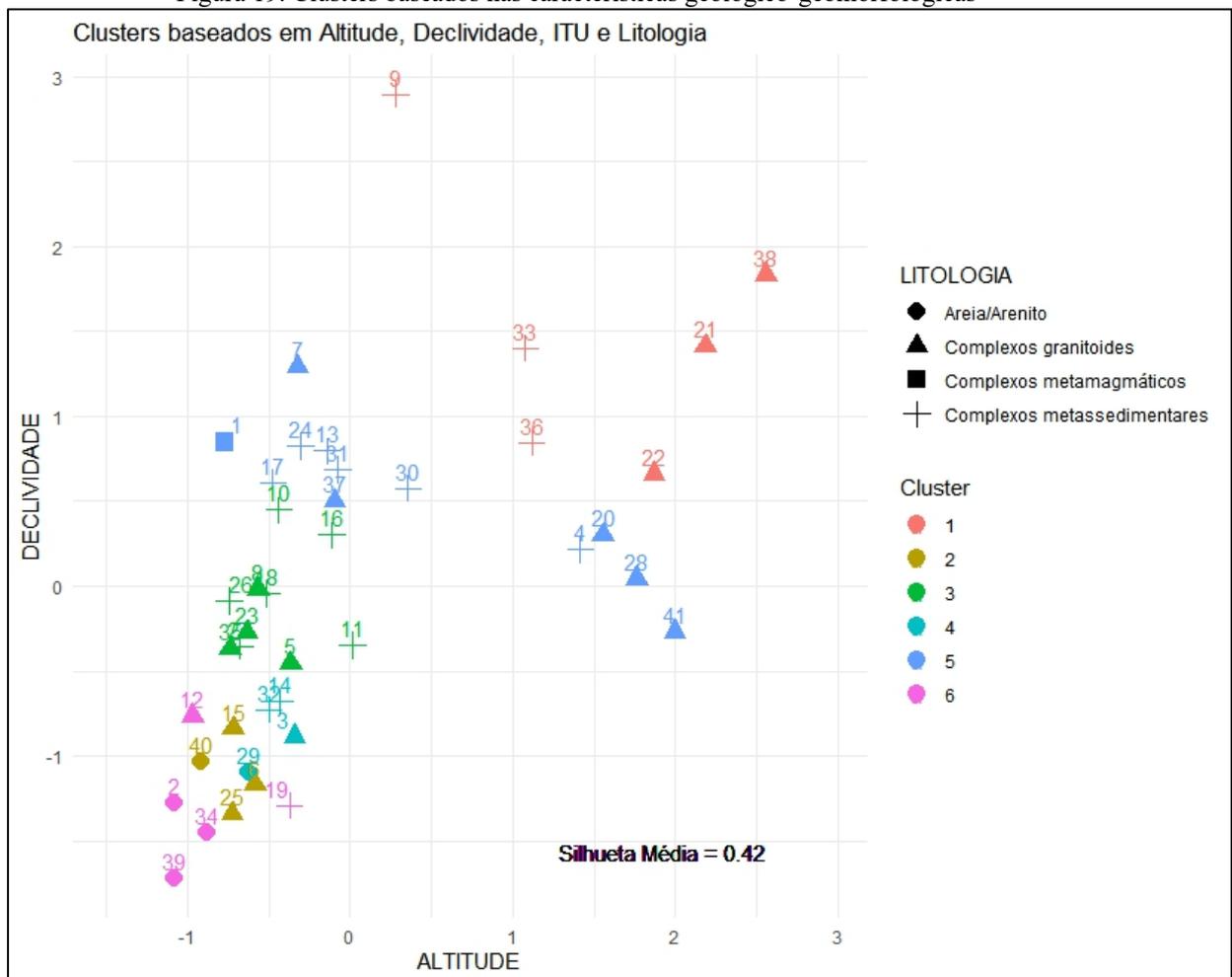
As 18 áreas que estão classificadas como complexos metassedimentares, destacam-se o ID4 que apresentou a maior altitude (634m), declividade (7,95%) e um ITU de 6,31 e o ID27 com a menor altitude (292m), declividade (5,98%) e maior ITU (6,52). A maior declividade dessa classificação foi no *buffer* ID9 com 17,23%, esse está inserido dentro do complexo de Serras das Águas Sertanejas, por isso apresenta a maior declividade, e conseqüentemente o menor ITU de 5,92, sua altitude é de 448m.

O complexo metamagmático foi o de menor ocorrência dentre os *buffers*, estando apenas o ID de número 1 classificado assim, sua altitude é de 309, sua declividade de 10,14%, está entre as mais altas, também por estar dentro do complexo de Serras, seu ITU foi de 6,33.

3.2.6. Análise de *Clustering* para variáveis Geológico-geomorfológicas

Para um melhor entendimento do comportamento dessas áreas, foi feita a análise de *clustering*, baseada nas variáveis geológico-geomorfológicas apresentadas acima. Essa análise agrupou as áreas a partir das semelhanças entre elas, dessa maneira, foram criados 6 grupos. O primeiro com 6 *buffers*, o segundo com 4, terceiro com 10 *buffers*, o quarto com 4, quinto e sexto com 12 e 5 *buffers*, respectivamente (Figura 19).

Figura 19. Clusters baseados nas características geológico-geomorfológicas



Autoria própria, 2023

O grupo 1 representado pela cor vermelha, está agrupado em 6 áreas, esse apresentou os menores valores de ITU, os maiores valores de altitude e os maiores valores

de declividade. Quanto a litologia 3 das áreas foram classificadas como complexos granitoides e 3 como complexos metassedimentares.

O grupo 2, representado na cor amarela, apresentou 4 áreas agrupadas. Elas apresentaram altos valores do ITU, a maioria das áreas estão dentro dos complexos granitoides, com exceção do ID40 que está classificado como Areia/Arenito. As altitudes desse grupo foram baixas, sendo a maior encontrada no *buffer* ID6 com 307m e a menor no ID40 com 252m. As declividades também foram baixas, o maior valor foi de 3,64% no ID40 e o menor de 2,56% no ID25. Assim o agrupamento foi feito baseado em baixas altitudes e declividades, altos ITU's e maioria de complexos granitoides.

O terceiro agrupamento (cor verde), apresentou 10 *buffers*. Esse grupo, predominantemente, possui médias altitudes e declividades e valores médios e altos de ITU. A maior altitude desse grupo foi a do ID11 com 405m, e a menor foi do ID35 com 282m. Quanto das declividades, a maior foi no ID10 de 8,76% e a menor foi de 5,63% no ID5. A maioria apresentou litologia de complexos metassedimentares, embora os *buffers* de ID's 5, 8, 23 e 35 estejam classificadas como complexos granitoides.

O grupo 4, representado pela cor azul claro, também apresentou 4 áreas, seus valores de ITU's foram médios e altos, as litologias foram variadas, podendo ser encontrado areia/arenito, complexos granitoides e metassedimentares. As altitudes e as declividades foram baixas.

O quinto grupo, está representado na cor azul escuro e foi o que apresentou maior quantidade de áreas agrupadas (12 *buffers*). Nele, estão os menores valores de ITU, as litologias são maioria de complexos metassedimentares, com exceção dos IDs 5,7,41,28 e 20 que estão dentro dos complexos granitoides e do ID1 que foi a única área classificada como complexo metamagmático. As altitudes foram variadas entre médias e altas, a maior pertence ao ID41 com 729m e a menor de 309m no ID1, as declividades também foram médias e altas, a maior foi de 11,68% no ID7 e a menor de 6,28% no ID41.

No último grupo, de cor rosa, foram incorporados 5 *buffers*, nesse estão os maiores valores de ITU, a maioria está classificada como Areia/Arenito, com exceção dos IDs 19 (complexo metassedimentar) e 12 (complexo granitoide). As altitudes e declividades desse agrupamento foram as mais baixas (Tabela 8).

Tabela 8. *Clusters* das variáveis geológico-geomorfológicas

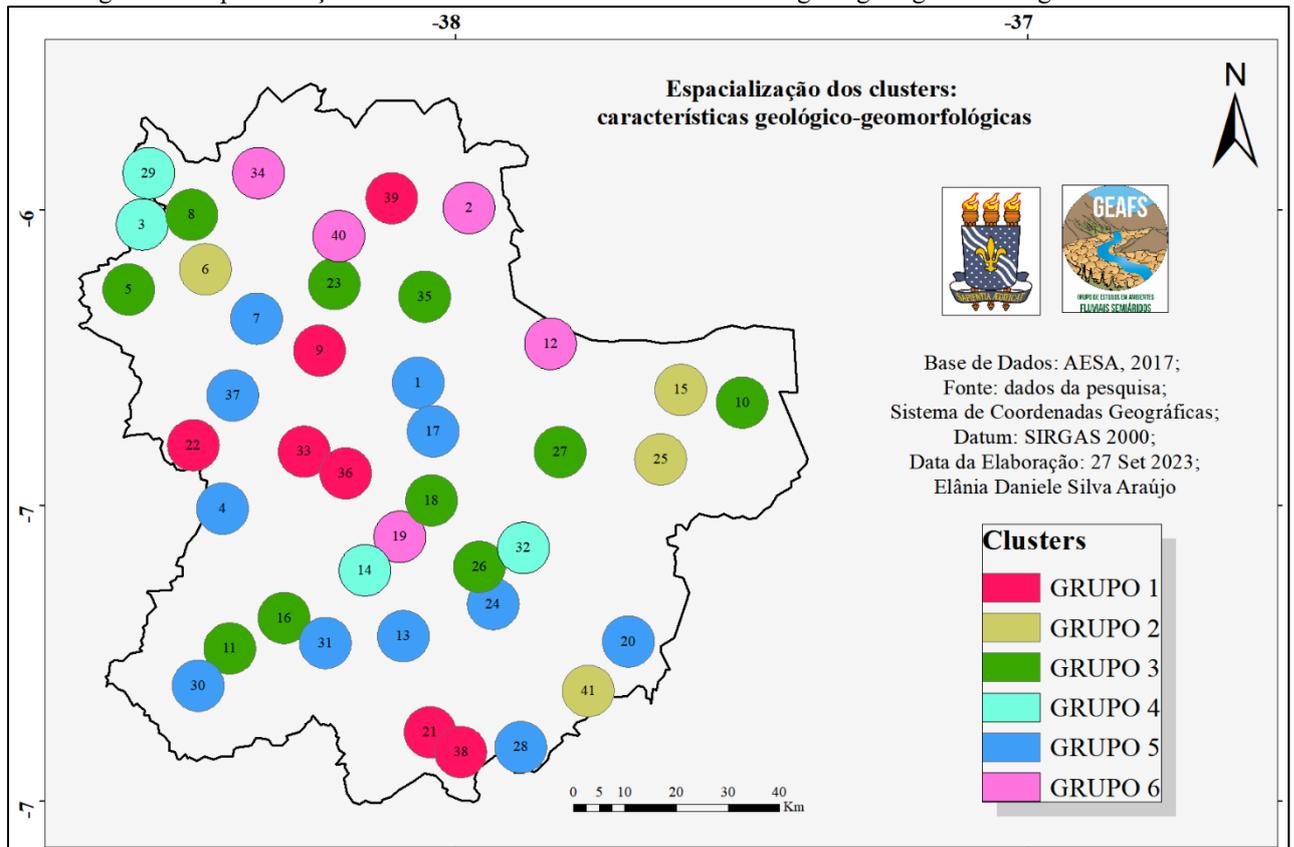
ID	Litologia	Altitude (m)	Declividade (%)	ITU
GRUPO 1				
9	Complexos metassedimentares	448	17,23	5,928228
21	Complexos granitoides	760	12,1	6,153611
22	Complexos granitoides	708	9,49	6,278989
33	Complexos metassedimentares	579	12,06	6,11794
36	Complexos metassedimentares	585	10,13	6,102042
38	Complexos granitoides	821	13,55	6,197685
GRUPO 2				
6	Complexos granitoides	307	3,16	6,63
40	Areia/Arenito	252	3,64	6,73
25	Complexos granitoides	284	2,56	6,72
15	Complexos granitoides	285	4,3	6,70
GRUPO 3				
35	Complexos granitoides	282	5,94	6,53
8	Complexos granitoides	310	7,15	6,45
23	Complexos granitoides	299	6,27	6,40
5	Complexos granitoides	343	5,63	6,51
26	Complexos metassedimentares	314	6,90	6,56
18	Complexos metassedimentares	319	7,06	6,52
10	Complexos metassedimentares	331	8,76	6,47
27	Complexos metassedimentares	292	5,98	6,52
16	Complexos metassedimentares	384	8,25	6,44
11	Complexos metassedimentares	405	6,0	6,55
GRUPO 4				
3	Complexos granitoides	314	4,14	6,49
14	Complexos metassedimentares	332	4,85	6,59
29	Areia/Arenito	300	3,43	6,53
32	Complexos metassedimentares	321	4,69	6,49
GRUPO 5				
37	Complexos granitoides	387	8,94	6,40
1	Complexos metamagmáticos	309	10,14	6,33
17	Complexos metassedimentares	325	9,32	6,30
24	Complexos metassedimentares	353	10,06	6,38
7	Complexos granitoides	350	11,68	6,45
4	Complexos metassedimentares	634	7,95	6,31
41	Complexos granitoides	729	6,28	6,32

28	Complexos granitoides	691	7,36	6,35
13	Complexos metassedimentares	379	9,96	6,26
20	Complexos granitoides	657	8,25	6,34
30	Complexos metassedimentares	461	9,2	6,26
31	Complexos metassedimentares	390	9,58	6,27
GRUPO 6				
39	Areia/Arenito	226	1,24	6,93
19	Complexos metassedimentares	309	2,74	6,82
12	Complexos granitoides	244	4,56	6,87
2	Areia/Arenito	226	2,78	6,81
34	Areia/Arenito	259	2,18	6,82

Autoria própria, 2023

Também é possível notar que alguns desses *buffers* estão espacialmente próximos, porém, a maioria está separado, porém é perceptível que as áreas de maiores altitudes e declividades estão no mesmo agrupamento, assim como as menores. Corroborando que o agrupamento foi feito baseado nas características homogêneas de cada *buffer* (Figura 20).

Figura 20. Espacialização dos *clusters* baseados nas características geológico-geomorfológicas



Autoria própria, 2023

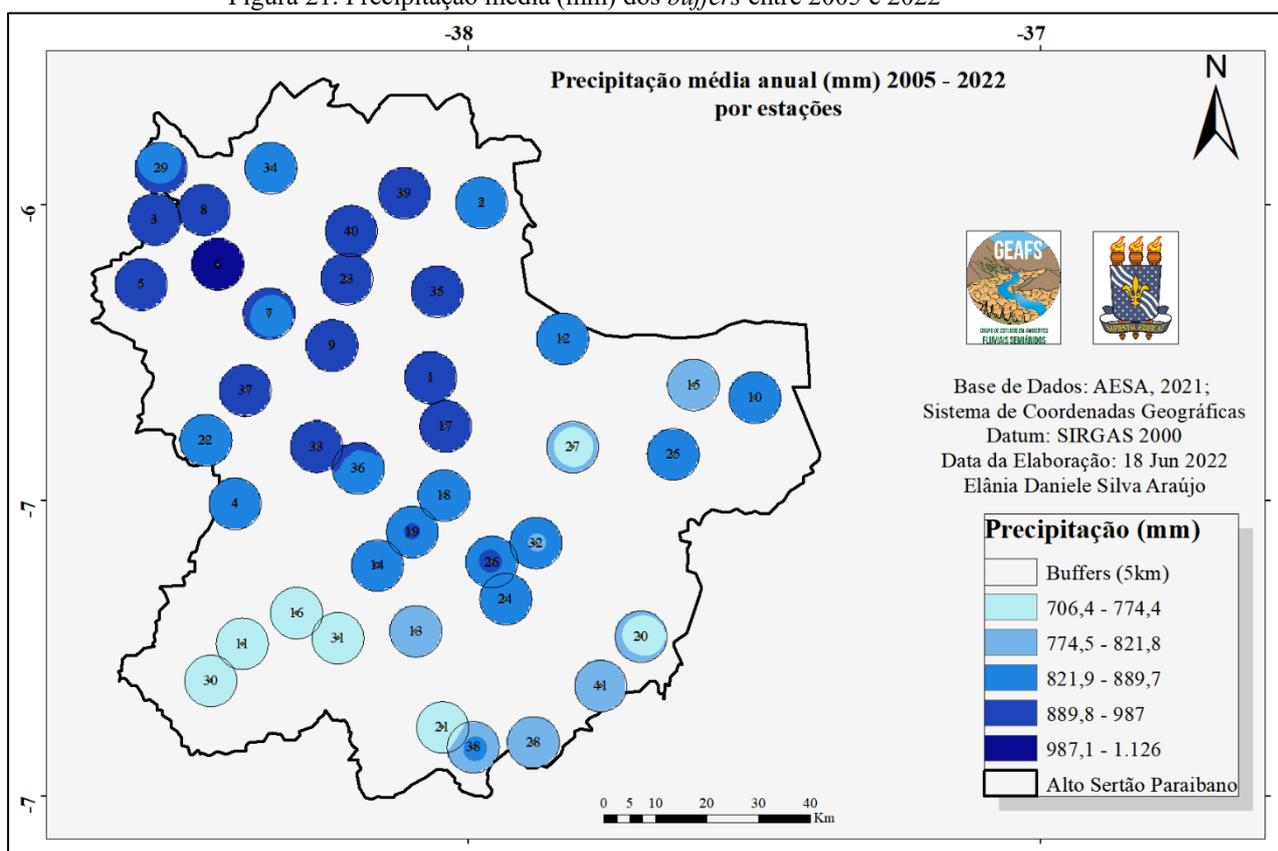
3.3. Análise da variabilidade da precipitação

Os dados de precipitação darão base ao entendimento do comportamento da vegetação, a partir das variáveis anuais de precipitação, da aplicação do índice de precipitação padronizado, dos valores acumulados antes de cada imagem de satélite e dos dados de correlação.

É importante entender também a variabilidade dos dias de chuvas para essas áreas, visto que esses irão influenciar diretamente no comportamento da vegetação de Caatinga, principalmente por ela apresentar uma resposta muito rápida aos volumes de precipitação. Assim, foram observados os números de dias de chuva (NDC), dias de chuva efetiva (NDCE), os dias consecutivos sem chuva (NDCSC) e sem chuva efetiva (NDCSCE).

A precipitação para os *buffers*, entre 2005 e 2022, variou entre 706,4 e 1.126. A maioria dos *buffers* apresentam uma média anual de precipitação acima de 800mm, uma quantidade até maior do que o esperado para o semiárido brasileiro, que tem uma média de até 800mm, as maiores médias se concentraram na porção norte e noroeste do mapa, enquanto as menores estiveram na porção sul (Figura 21).

Figura 21. Precipitação média (mm) dos *buffers* entre 2005 e 2022



Autoria própria, 2023

O índice de precipitação padronizado, também foi aplicado para dar subsídio a análise do comportamento da vegetação das áreas, assim, identificou-se que para área em estudo foi encontrado seis classes de umidade, desde o extremamente seco até o extremamente chuvoso, embora esses extremos tenham sido encontrados em quantidade menor e apenas para algumas das áreas. Os IDs 12, 15, 28 e 29, apresentaram um ano extremamente seco, cada um, totalizando 4 anos extremamente secos ao longo da série temporal. Já os anos extremamente chuvosos foram identificados nos IDs 32, 35 e 41, totalizando 3 para a série. Para todas as áreas o maior quantitativo foi de anos classificados como habituais. Os IDs 13, 19 e 30 não apresentaram muita variação quanto a classificação, apresentando anos habituais e moderadamente chuvosos, apenas (Tabela 9).

Tabela 9. Contagem dos anos classificados por buffer

ID	Ext. Chuvoso	Muito chuvoso	Mod. Chuvoso	Habitual	Mod. Seco	Muito Seco	Ext. Seco
1	0	0	6	6	2	4	0
2	0	3	2	7	2	4	0
3	0	2	3	8	1	4	0
4	0	2	3	6	4	3	0
5	0	3	1	10	2	2	0
6	0	1	4	8	3	2	0
7	0	3	3	8	1	3	0
8	0	2	5	10	1	0	0
9	0	1	3	9	2	2	0
10	0	4	3	8	0	3	0
11	0	3	3	9	1	2	0
12	0	1	6	7	1	2	1
13	0	0	5	13	0	0	0
14	0	0	5	13	0	0	0
15	0	3	3	6	3	2	1
16	0	3	1	7	5	2	0
17	0	3	4	8	1	2	0
18	0	2	6	6	0	4	0
19	0	0	6	12	0	0	0
20	0	4	2	8	1	3	0
21	0	2	6	10	0	0	0
22	0	0	7	10	1	0	0
23	0	4	0	7	3	4	0
24	0	4	1	6	3	4	0
25	0	3	3	7	1	4	0
26	0	0	5	12	1	0	0
27	0	2	3	6	5	2	0
28	0	2	3	7	3	2	1
29	0	1	5	7	0	4	1
30	0	0	6	12	0	0	0
31	0	3	3	5	4	3	0
32	1	3	3	5	4	2	0
33	0	2	6	4	4	2	0
34	0	4	1	6	3	4	0
35	1	0	4	7	2	4	0
36	0	1	5	12	0	0	0

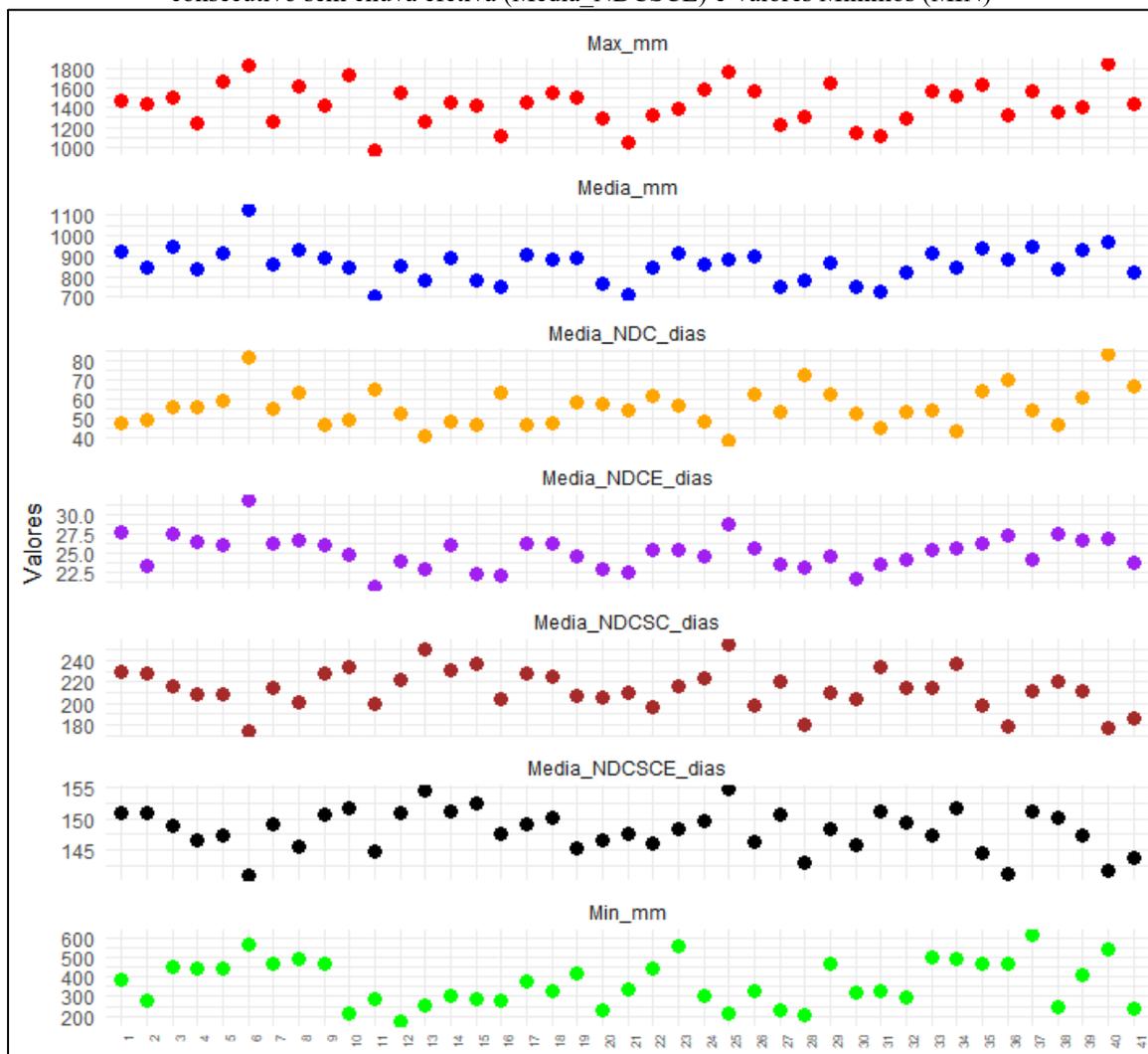
37	0	1	5	11	1	0	0
38	0	3	3	5	4	3	0
39	0	3	0	9	2	4	0
40	0	4	2	8	1	3	0
41	1	2	2	8	3	2	0

Autoria própria, 2023

O *buffer* de ID6 se destaca com a maior média de precipitação para esse período com 1128,2, seguido dos IDs 40 e 3 com 969,7 e 948,7, respectivamente (Figura 22 e Tabela 10). Esses *buffers* também se destacaram por estarem entre os maiores valores máximos anuais com 1824, 1837,4 e 1505,9mm, respectivamente, esses valores são referentes ao ano de 2008 que foi classificado como Muito Chuvoso para essas áreas, apresentaram também as maiores médias dos NDC e NDCE e as menores médias dos NDCSC e NDCSCE, além de apresentarem uma distribuição com relação a classificação do SPI, apresentando anos desde muito chuvosos até muito secos. São áreas que estão relativamente próximas espacialmente e apresentam altitudes e declividades baixas.

Os de IDs 11, 21 e 31 apresentaram as menores médias (706,3; 710,9 e 727,8mm, respectivamente), bem como os valores máximos anuais mais baixos de 962,5; 1042 e 1107,6, respectivamente. Para esses *buffers* não foi o ano de 2008 o que apresentou os maiores valores, foi 2009 (IDs 11 e 31) e 2011 (ID21), esses dois anos foram classificados como Muito Chuvoso para essas áreas. Os IDs 11 e 31 estão inseridos no complexo metassedimentar e apresentam altitudes e declividades médias, enquanto o ID21, apresenta altitude e declividade altas e sua litologia é composta por complexos granitoides.

Figura 22. Comportamento das variáveis de precipitação por *buffer* entre 2005 e 2022 Valores Máximos (MAX); Média; valores médios das variáveis: número de dias de chuva (Media_NDC); número de dias de chuva efetiva (Media_NDCE); número de dias consecutivos sem chuva (Media_NDCSC) e número consecutivo sem chuva efetiva (Media_NDCSCE) e Valores Mínimos (MIN)



Autoria própria, 2023

Tabela 10. Valores Médios, Máximos e Mínimos da precipitação anual e valores médios das variáveis: número de dias de chuva (NDC); número de dias de chuva efetiva (NDCE); número de dias consecutivos sem chuva (NDCSC) e número consecutivo sem chuva efetiva (NDCSCE)

ID	Prec. Média anual	Máx. anual.	Mín. anual	NDC	NDCE	NDCSC	NDCSCE
1	921.5	1460.8	385.7	47.8	27.6	228.9	257,83
2	846.1	1431.5	278.1	49.3	23.3	228.2	268,39
3	948.7	1505.9	455.1	56.3	27.5	215.4	261,72
4	835.1	1238.9	442.4	55.7	26.5	208.8	258,72
5	910.8	1663.8	445.5	58.8	25.9	209.2	266,00
6	1128.2	1824	565.7	81.8	31.9	173.9	251,78
7	858.8	1264.5	469.8	55.1	26.2	214.5	264,88
8	930.7	1608.1	495.1	63.8	26.7	201.6	263,83
9	889.9	1415.9	471	46.5	26.1	228.5	264,94
10	844.1	1723.9	209.5	49.3	24.8	233.5	273,28
11	706.3	962.5	288.1	64.7	20.8	199.7	277,89

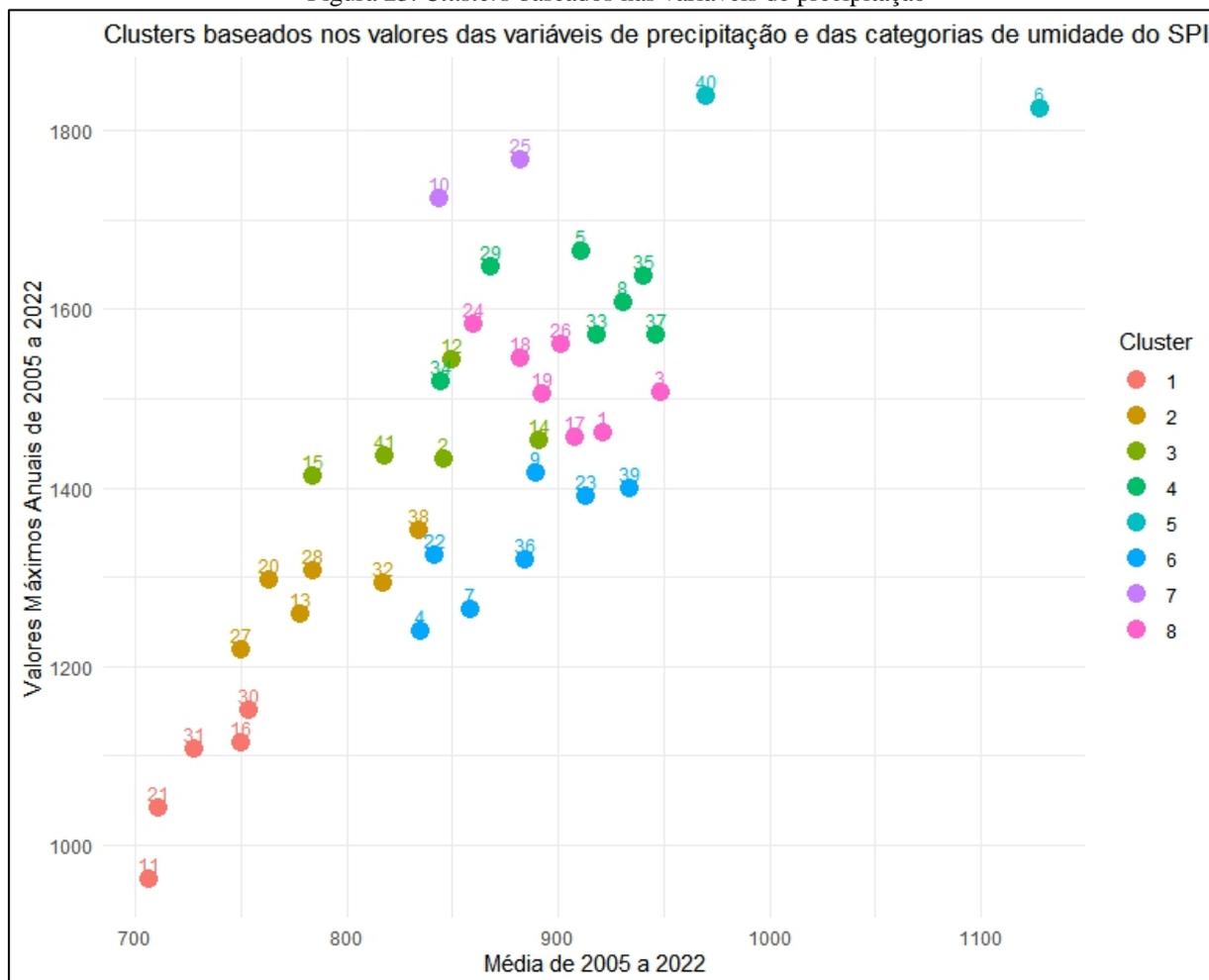
12	849.6	1542.9	172.8	52.2	23.9	222.5	270,28
13	778.0	1258.1	256	40.5	23.1	250.9	274,22
14	891.0	1453.6	300.8	48.8	26.0	230.5	262,28
15	784.1	1413.8	289.7	46.3	22.4	237.1	274,72
16	750.2	1114.4	276.7	63.4	22.2	204.4	270,89
17	908.3	1456.8	378.5	46.9	26.3	228.1	264,83
18	882.0	1544.9	326.4	47.4	26.2	225.2	263,00
19	892.2	1504.1	415.8	58.2	24.7	206.4	264,78
20	763.6	1296.2	231.2	57.6	22.9	205.9	277,06
21	710.9	1042	334.6	53.8	22.6	210.3	272,44
22	841.6	1325.4	442.5	61.8	25.4	196.5	268,39
23	912.9	1390.9	556	56.5	25.5	215.5	266,56
24	860.3	1583.6	304.6	48.4	24.6	224.1	267,33
25	882.0	1766.6	216	38.3	28.7	255.1	265,89
26	901.2	1560.3	327.2	62.4	25.6	197.9	266,56
27	750.3	1219.4	232.6	53.7	23.6	220.4	274,44
28	783.7	1308	202.9	72.3	23.1	180.6	264,83
29	868.1	1646.9	467.5	62.7	24.5	209.4	263,44
30	753.8	1150.4	318.9	52.6	21.8	203.6	270,44
31	727.8	1107.6	324.9	45.3	23.5	233.6	273,83
32	817.4	1292.7	296.9	53.7	24.2	215.0	269,50
33	918.5	1571	498.4	54.0	25.4	213.9	263,06
34	844.2	1519.3	488.8	43.6	25.6	236.8	268,11
35	940.3	1637	467.2	63.9	26.3	198.1	260,11
36	884.3	1318.8	469.3	70.1	27.3	178.1	264,39
37	946.5	1570.6	617.1	54.2	24.1	210.8	269,56
38	834.6	1352.9	247.7	46.7	27.5	221.1	255,06
39	933.6	1399	406.5	61.2	26.7	211.5	259,28
40	969.7	1837.4	544.5	83.3	26.8	177.0	262,50
41	817.7	1436	236.4	67.1	23.8	186.5	261,94

Autoria própria, 2023

3.3.1. Análise de *Clustering* para variáveis de Precipitação

Também foi efetuada uma análise de *clustering* para compreender o comportamento das áreas com relação a dinâmica da precipitação. Assim, foram criados oito grupos (Figura 23).

Figura 23. Clusters baseados nas variáveis de precipitação



Autoria própria, 2023

O Grupo 1 e 2, representados pelas cores vermelha e amarela, agrupou 5 e 6 *buffers*, respectivamente. Foram aqueles que apresentaram as menores médias, os menores valores máximos e as menores médias dos números de dias de chuva efetiva. O ID11, pertencente ao grupo 1 foi o *buffer* com a menor média de precipitação e de dias de chuva efetiva, bem como, com valor máximo mais baixo.

O grupo 3 (7 *buffers*) e 4 (5 *buffers*), são aqueles referentes as cores verdes, esses apresentaram valores mais altos, especialmente o grupo 4, em que todas as variáveis foram de valores altos, o ID6 se destacou com a maior média de precipitação da série, com 1128,2mm e de NDCE e o ID40 com o maior valor máximo. O grupo 3 apresentou valores máximos altos e médias anuais médias e altas.

Os grupos 5 e 6, representados pelas cores azuis, são os *buffers* que apresentaram os valores médios para todas as variáveis. Já nos grupos 7 (cor lilás) e 8 (cor rosa), foram

incorporados 2 e 7 *buffers*, respectivamente. Essas áreas apresentaram uma variação entre valores médios e baixos para todas as variáveis utilizadas para a *clusterização* (Tabela 11).

Tabela 11. Clusters das variáveis de precipitação. Valores Médios, Máximos e Mínimos da precipitação anual e valores médios das variáveis: número de dias de chuva (NDC); número de dias de chuva efetiva (NDCE); número de dias consecutivos sem chuva (NDCSC) e número consecutivo sem chuva efetiva (NDCSCE)

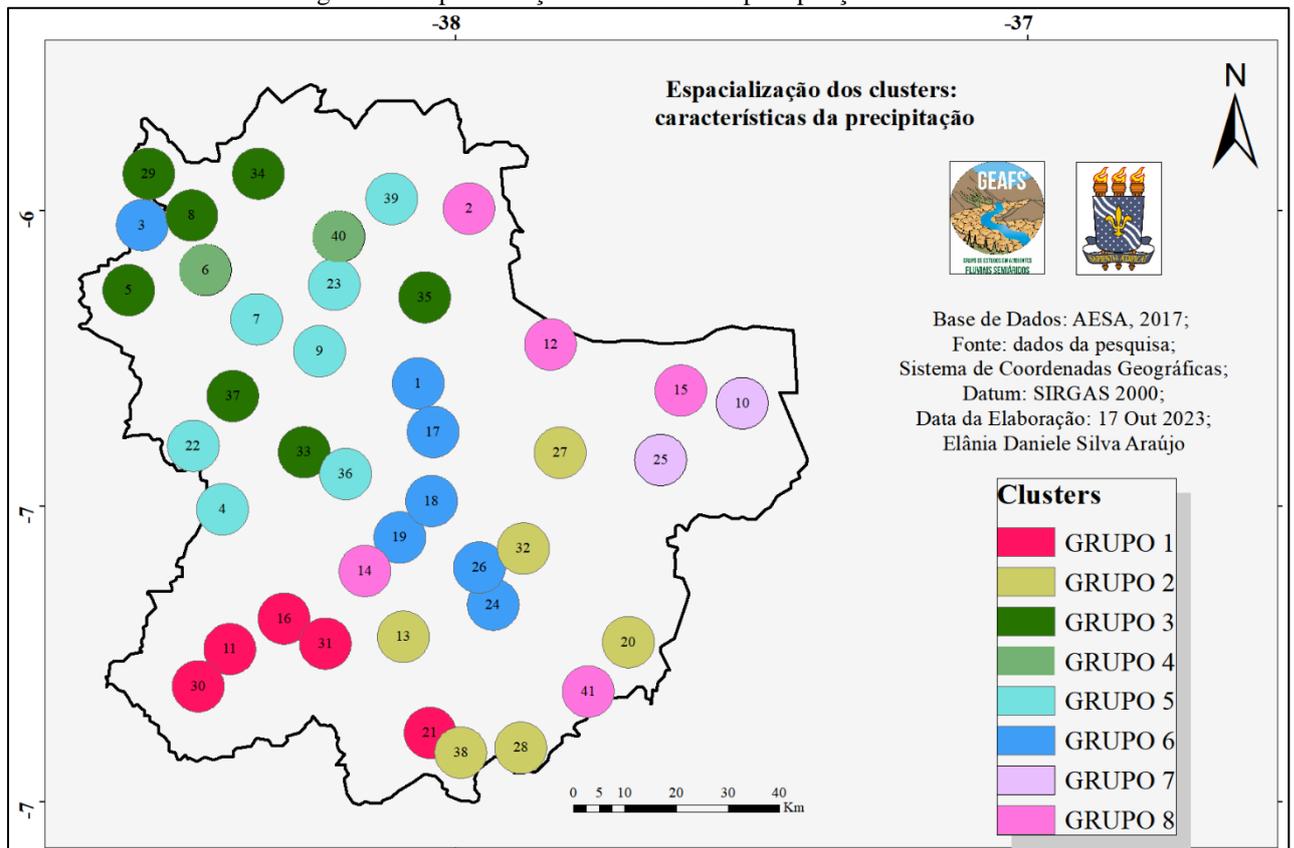
ID	Prec. Média	Máx. anual	Mín. anual	NDC	NDCE	NDCSC	NDCSCE
GRUPO 1							
11	706,3	962,5	288,1	64,7	20,8	199,7	277,9
16	750,2	1114,4	276,7	63,4	22,2	204,4	270,9
21	710,9	1042	334,6	53,8	22,6	210,3	272,4
30	753,8	1150,4	318,9	52,6	21,8	203,6	270,4
31	727,8	1107,6	324,9	45,3	23,5	233,6	273,8
GRUPO 2							
13	778,0	1258,1	256	40,5	23,1	250,9	274,2
20	763,6	1296,2	231,2	57,6	22,9	205,9	277,1
27	750,3	1219,4	232,6	53,7	23,6	220,4	274,4
28	783,7	1308	202,9	72,3	23,1	180,6	264,8
32	817,4	1292,7	296,9	53,7	24,2	215,0	269,5
38	834,6	1352,9	247,7	46,7	27,5	221,1	255,1
GRUPO 3							
5	910,8	1663,8	445,5	58,8	25,9	209,2	266,0
8	930,7	1608,1	495,1	63,8	26,7	201,6	263,8
29	868,1	1646,9	467,5	62,7	24,5	209,4	263,4
33	918,5	1571	498,4	54,0	25,4	213,9	263,1
34	844,2	1519,3	488,8	43,6	25,6	236,8	268,1
35	940,3	1637	467,2	63,9	26,3	198,1	260,1
37	946,5	1570,6	617,1	54,2	24,1	210,8	269,6
GRUPO 4							
6	1128,2	1824	565,7	81,8	31,9	173,9	251,8
40	969,7	1837,4	544,5	83,3	26,8	177,0	262,5
GRUPO 5							
4	835,1	1238,9	442,4	55,7	26,5	208,8	258,7
7	858,8	1264,5	469,8	55,1	26,2	217,6	264,9
9	889,9	1415,9	471	46,5	26,1	228,5	264,9
22	841,6	1325,4	442,5	61,8	25,4	196,5	268,4
23	912,9	1390,9	556	56,5	25,5	215,5	266,6
36	884,3	1318,8	469,3	70,1	27,3	178,1	264,4
39	933,6	1399	406,5	61,2	26,7	211,5	259,3
GRUPO 6							
1	921,5	1460,8	385,7	47,8	27,6	228,9	257,8
3	948,7	1505,9	455,1	56,3	27,5	215,4	261,7
17	908,3	1456,8	378,5	46,9	26,3	228,1	264,8
18	882,0	1544,9	326,4	47,4	26,2	225,2	263,0
19	892,2	1504,1	415,8	58,2	24,7	206,4	264,8
24	860,3	1583,6	304,6	48,4	24,6	224,1	267,3
26	901,2	1560,3	327,2	62,4	25,6	197,9	266,6
GRUPO 7							
10	844,1	1723,9	209,5	49,3	24,8	233,5	273,3
25	882,0	1766,6	216	38,3	28,7	255,1	265,9
GRUPO 8							
2	846,1	1431,5	278,1	49,3	23,3	228,2	268,4
12	849,6	1542,9	172,8	52,2	23,9	222,5	270,3
14	891,0	1453,6	300,8	48,8	26,0	230,5	262,3

15	784,1	1413,8	289,7	46,3	22,4	237,1	274,7
41	817,7	1436	236,4	67,1	23,8	186,5	261,9

Autoria própria, 2023

Espacialmente, o grupo 1 está bem próximo, com exceção do ID21, que está mais isolado (Figura 24). Nos grupos 3, os *buffers* ficaram mais próximos na parte a noroeste do mapa, já os demais ficaram mais espalhados, assim como os grupos 2 e 8 que também se mantiveram espalhados. Os grupos 4, 5, 6 e 7, estiveram próximos espacialmente, com exceção do ID3 que se encontra mais isolado. Comparado com o mapa de precipitação, o de espacialização dos *clusters* segue o mesmo padrão com as áreas mais chuvosas a noroeste (Grupos 3 e 4) e as menos chuvosas na parte sul do mapa (Grupos 1 e 2).

Figura 24. Espacialização dos *clusters* de precipitação



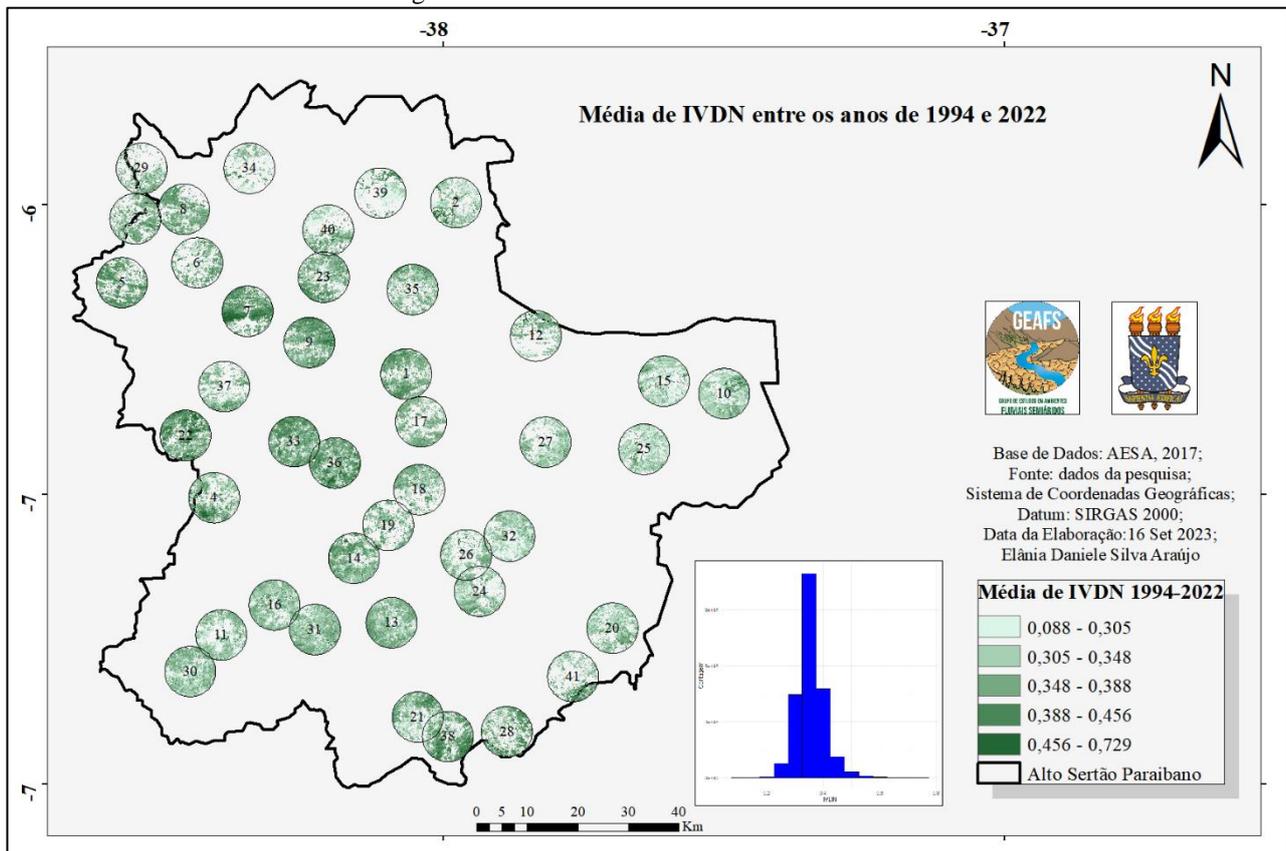
Autoria própria, 2023

3.4. Análise geral da sazonalidade da vegetação

Para a análise da sazonalidade da vegetação foram obtidos os valores médios, da amplitude, máximos e mínimos e o desvio padrão das 88 imagens. Os valores do IVDN, variaram entre 0,088 e 0,729, porém, as médias para cada *buffer*, estiveram entre 0,300 e

0,402, não há valores negativos, pois, as análises foram feitas apenas para vegetação, a partir da classificação do Mapbiomas (Figura 25).

Figura 25. Médias do IVDN entre 1994 e 2022



Autoria própria, 2023

As maiores médias foram: 0,402; 0,392; e 0,391 dos ID's 7, 22 e 38, esses apresentam uma amplitude de 0,578; 0,534 e 0,480, valores mínimos de 0,093; 0,117 e 0,189, valores máximos de 0,670; 0,650 e 0,669 e desvio padrão de 0,052; 0,047 e 0,049, respectivamente. O *buffer* de ID7 (Figura 26A) foi a área visitada mais densa e preservada, com uma diversidade de espécies de diferentes portes, nessa área as espécies se mantiveram com folhas mesmo no período seco. No ID22 (Figura 26B), que apresentou a segunda maior média, foi possível identificar uma alta densidade e um porte mais elevado da vegetação. Provavelmente a característica da altitude (708m) contribua para uma maior umidade na área. Nesse ponto foi possível identificar espécies como Catingueira, Marmeleiro, Jurema-preta e a *Tabebuia aurea* (Craibeira). O *buffer* de ID38 também era uma área densa, aparentava estar preservado (Figura 26C), mas por ter sido visitado no período seco, a vegetação estava mais seca, por estar inserido nos complexos granitoides e apresentar uma declividade elevada, a capacidade de retenção de umidade pelo solo é

menor, fazendo com que diferente do ID7, a vegetação não se mantenha verde nesse período.

Figura 26. Maiores médias de vegetação. A. *buffer* ID7 período seco; B. ID22 período chuvoso; C. ID38 período seco



Araújo, 2023

Chama-se a atenção para o *buffer* de ID36, que apresentou a quarta maior média de IVDN (0,382), porém, lá foi encontrada uma área que havia sido queimada a pouco tempo, o ponto a ser visitado foi marcado onde havia uma mancha de vegetação, mas ao chegar no local, constatou-se que parte da mancha de vegetação tinha sido queimada (Figura 27), vale salientar que essa prática é comum no semiárido durante o período seco, porém se intensificou muito no ano de 2023.

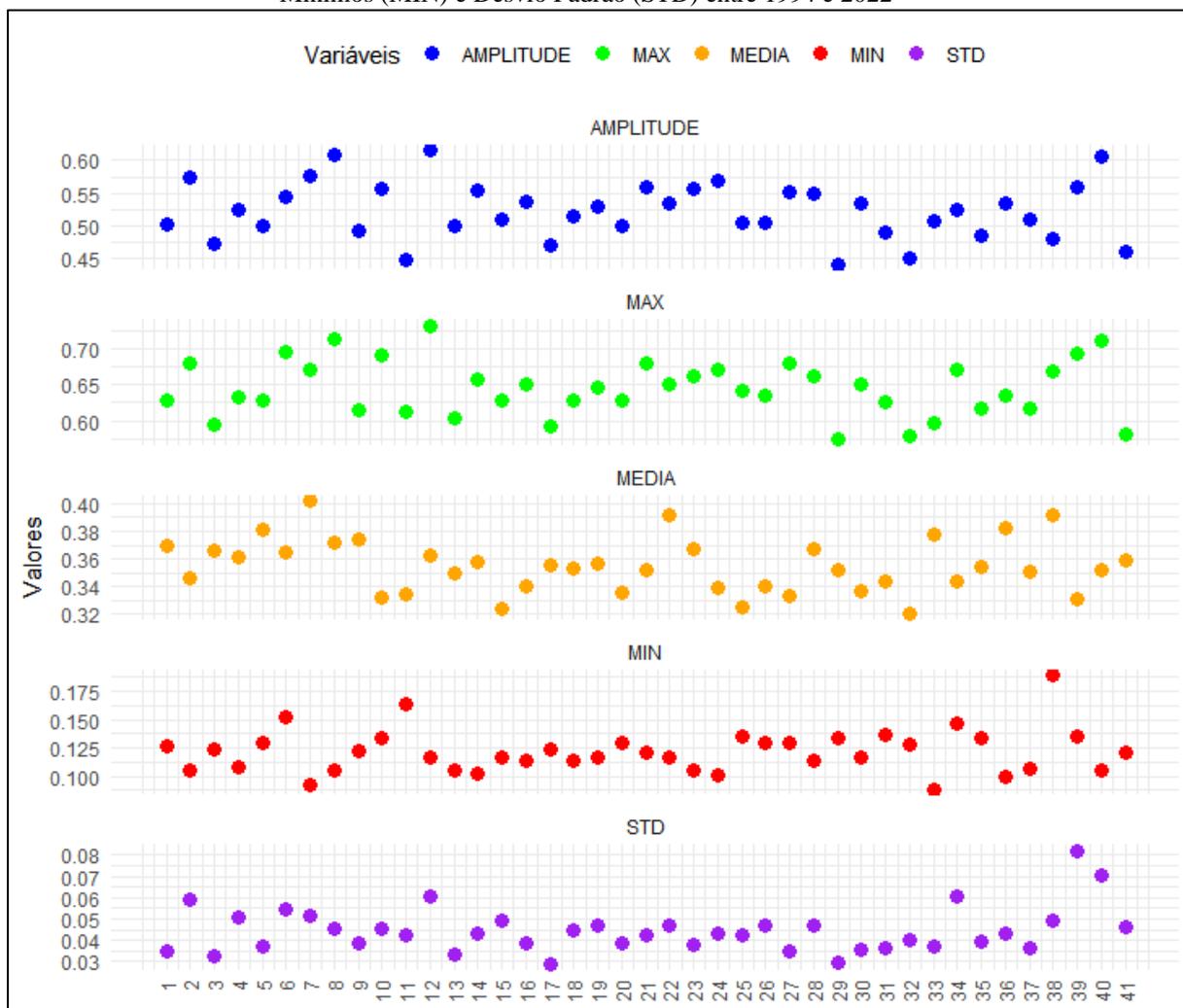
Figura 27. Área queimada no ID36



Araújo, 2023

As menores médias foram de 0,320; 0,324 e 0,326 localizados nos ID's 32, 15 e 25, esses *buffers* apresentam amplitude de 0,450; 0,510 e 0,505, valores mínimos de 0,128; 0,117 e 0,135, máximos de 0,579; 0,627 e 0,640 e desvio padrão de 0,040; 0,050 e 0,042, respectivamente (Figura 28; Tabela 12).

Figura 28. Comportamento das variáveis do IVDN: Amplitude, Valores Máximos (MAX), Média, Valores Mínimos (MIN) e Desvio Padrão (STD) entre 1994 e 2022



Autoria própria, 2023

Tabela 12. Média, amplitude, máximo, mínimo e desvio padrão do IVDN (1994-2022)

ID	Média	Amplitude	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
1	0.369	0.502	0.127	0.628	0.035
2	0.346	0.575	0.105	0.680	0.059
3	0.366	0.471	0.124	0.595	0.033
4	0.362	0.524	0.107	0.632	0.051
5	0.381	0.500	0.129	0.629	0.037
6	0.365	0.544	0.152	0.696	0.054
7	0.402	0.578	0.093	0.670	0.052
8	0.372	0.608	0.104	0.712	0.045
9	0.375	0.492	0.122	0.614	0.039
10	0.332	0.557	0.134	0.690	0.046
11	0.335	0.448	0.164	0.612	0.042
12	0.363	0.615	0.116	0.732	0.061
13	0.349	0.499	0.105	0.603	0.033
14	0.358	0.555	0.102	0.657	0.043
15	0.324	0.510	0.117	0.627	0.050
16	0.341	0.537	0.114	0.651	0.039
17	0.355	0.470	0.123	0.593	0.029
18	0.353	0.514	0.113	0.627	0.045
19	0.357	0.529	0.116	0.645	0.047
20	0.335	0.499	0.130	0.629	0.039
21	0.352	0.558	0.120	0.679	0.043
22	0.392	0.534	0.117	0.650	0.047
23	0.367	0.556	0.105	0.661	0.038
24	0.339	0.570	0.101	0.671	0.043
25	0.326	0.505	0.135	0.640	0.042
26	0.340	0.505	0.129	0.634	0.047
27	0.334	0.550	0.129	0.680	0.035
28	0.367	0.549	0.114	0.663	0.047
29	0.351	0.441	0.133	0.574	0.030
30	0.337	0.534	0.116	0.650	0.036
31	0.343	0.490	0.136	0.626	0.037
32	0.320	0.450	0.128	0.579	0.040
33	0.377	0.508	0.088	0.596	0.037
34	0.344	0.524	0.147	0.670	0.061
35	0.354	0.485	0.133	0.618	0.039
36	0.382	0.535	0.100	0.635	0.043
37	0.351	0.509	0.107	0.616	0.036
38	0.391	0.480	0.189	0.669	0.049
39	0.331	0.558	0.135	0.693	0.082
40	0.351	0.606	0.105	0.711	0.070
41	0.359	0.460	0.121	0.581	0.046

Autoria própria, 2023

O *buffer* de ID32 (Figura 29A) está bem degradado e com pouca diversidade de espécies, o ID15 (Figura 29B) apesar de apresentar uma média muito baixa e de grande parte dele apresentar um grau de degradação, a área visitada é densa, apresentou uma variedade de espécies, como a *Commiphora leptophloeos* (umburana), *Jatropha pohliana* (pinhão), *Erythrina verna* (mulungu), *Anadenanthera colubrina* (angico), além de catingueira, jurema-preta e marmeleiro. Já o ID25 (Figura 29C), apresentou uma vegetação

densa, porém com poucas espécies, foi possível identificar a *Apidosperma pyriforme* (pereiro), catingueira, marmeleiro e jurema-preta, todas essas espécies são características de ambientes antropizados.

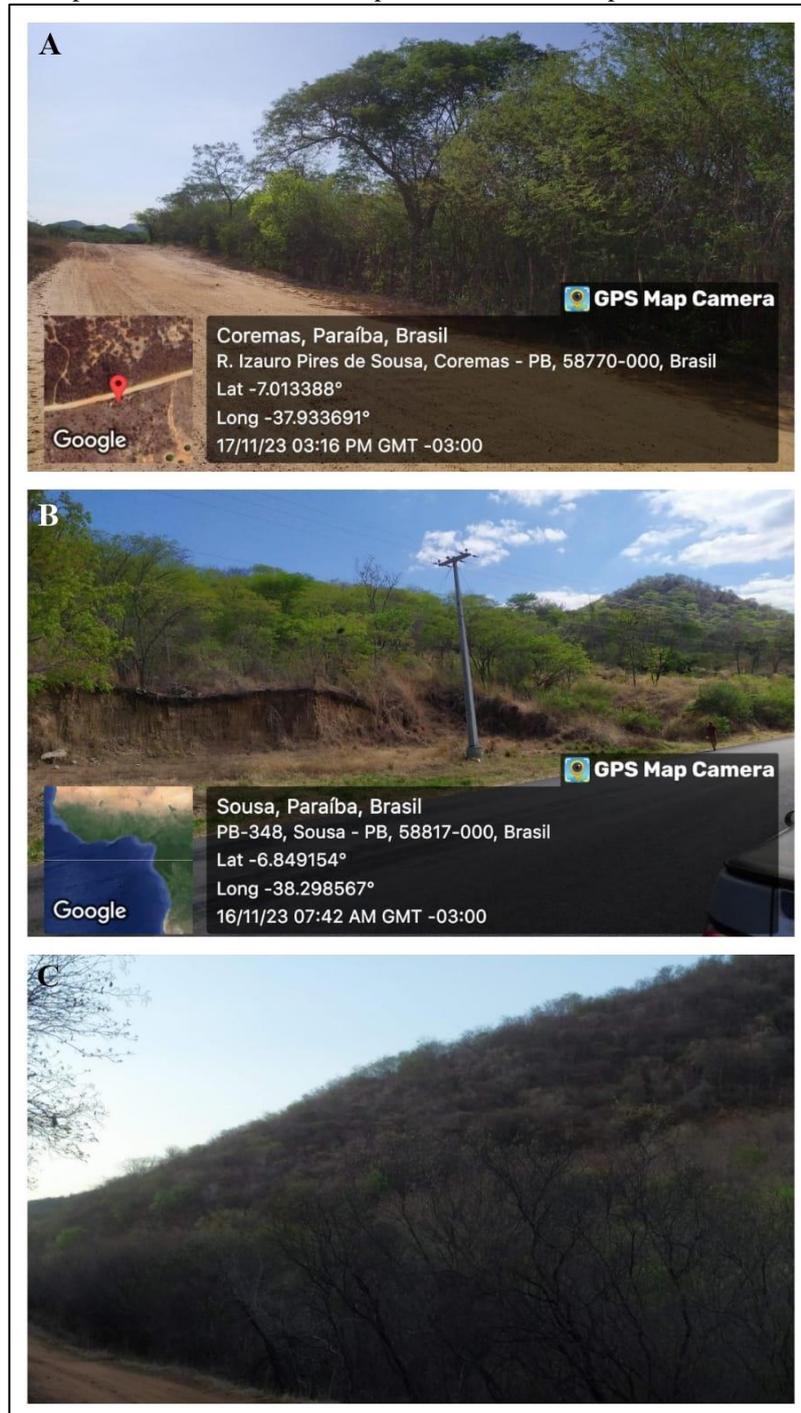
Figura 29. Menores médias do IVDN. A. ID 32, período seco; B. ID15, período seco; ID25, período seco



Araújo, 2023

Os *buffers* de ID's 12, 8 e 40 (Figura 30 A, B e C) foram os que apresentaram maiores amplitudes com os respectivos valores 0,615; 0,608 e 0,606 os menores valores foram encontrados nos ID's 29, 11 e 32 com 0,441; 0,448 e 0,450, respectivamente. Com relação ao Desvio Padrão os maiores valores foram dos IDs 39, 40 e 12 com 0,082; 0,070; 0,061, respectivamente, enquanto os menores valores foram 0,029; 0,030 e 0,033 correspondente aos 17, 29 e 3, respectivamente.

Figura 30. Maiores amplitudes do IVDN. A. ID12, período seco; B. ID8, período seco; C. ID40, período seco

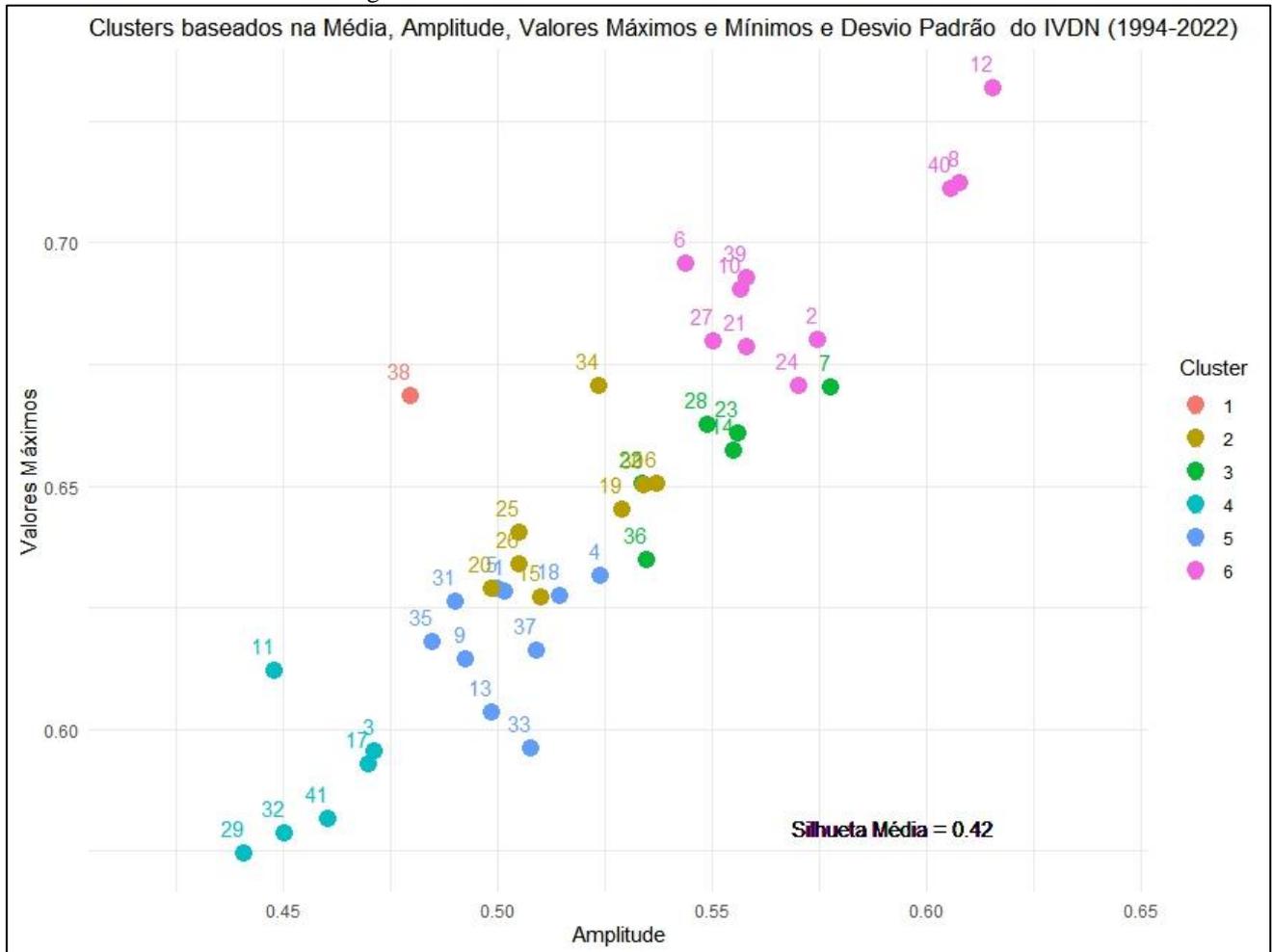


Araújo, 2023

3.4.1. Análise de *Clustering* para variáveis do IVDN

Foi efetuada, também, a análise de *clustering* para essas variáveis da vegetação, com intuito identificar as semelhanças entre esses grupos. Assim, foi feito o agrupamento em seis *clusters* (Figura 31).

Figura 31. *Clusters* baseados nas variáveis do IVDN



Autoria própria, 2023

O agrupamento baseado nas variáveis do IVDN, dividiu os *buffers* levando em consideração suas amplitudes, médias, valores máximos e mínimos e desvio padrão. Percebe-se que o primeiro *cluster*, representado na cor vermelha está composto por um único *buffer*, que apresenta a terceira maior média do índice, uma amplitude baixa e os valores máximos, mínimos e o desvio padrão foram médios. O que chama a atenção nesse *buffer* é sua altitude, ele está classificado como a maior altitude dentre todas as áreas observadas.

O segundo agrupamento (cor amarela), apresentou 8 áreas. Foi composto pelos *buffers* que apresentaram as amplitudes e valores máximos intermediários, mas as médias do IVDN foram predominantemente baixas. O terceiro (cor verde) contém 6 *buffers*, e apresentou médias elevadas, amplitudes e valores máximos médios e altos.

Nos grupos 4 e 5, representados pelas cores azul claro e azul escuro, estão 6 e 10 *buffers*, respectivamente. Nesses estão contidos os menores valores máximos e as menores amplitudes, as médias foram variadas.

O grupo 6 (cor rosa) apresentou 10 áreas, nas quais puderam ser encontrados os valores altos de amplitude e de valores máximos e médias variadas. Assim, é perceptível que o agrupamento foi baseado, principalmente nas médias, amplitudes e valores máximos (Tabela 13).

Tabela 13. *Clusters* das variáveis do IVDN

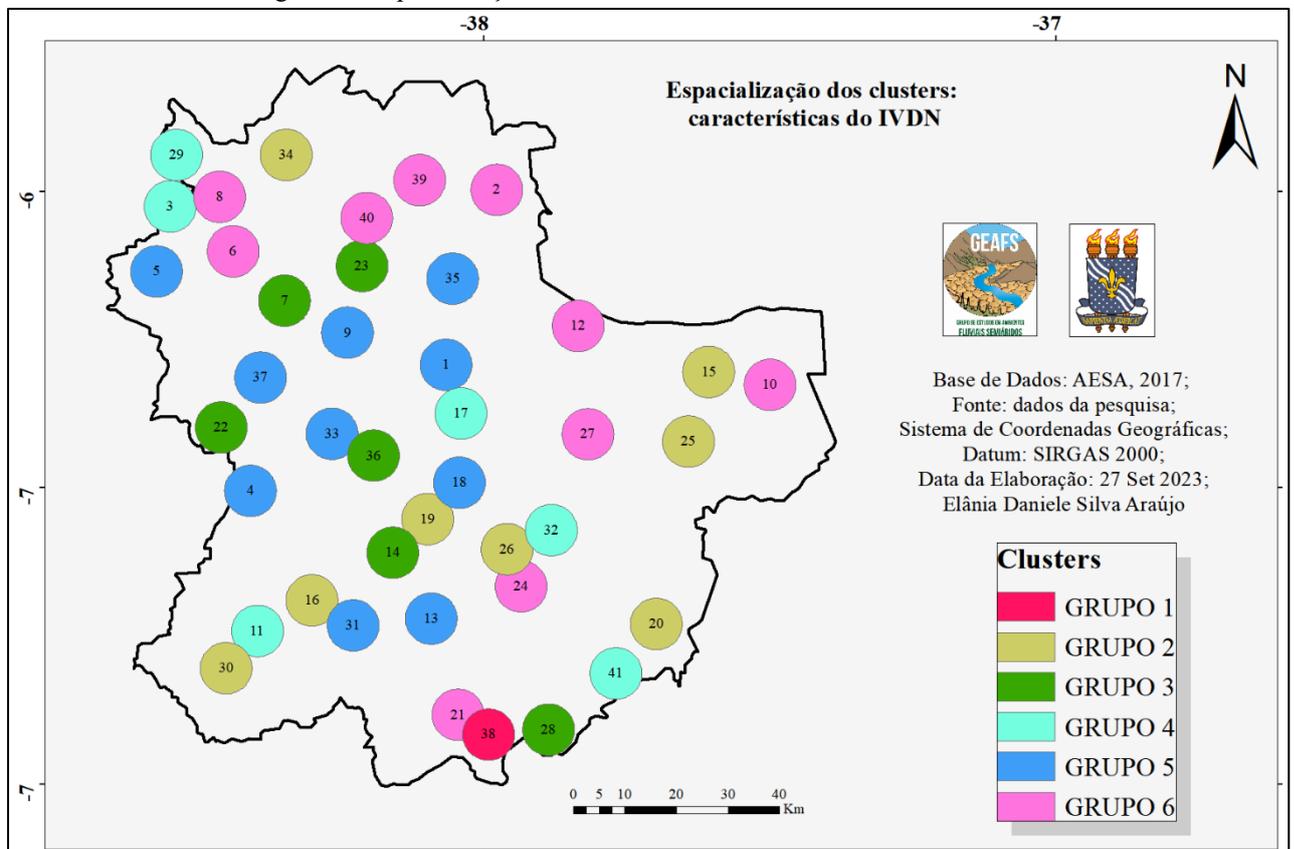
ID	Média	Amplitude	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
GRUPO 1					
38	0,391	0,480	0,189	0,669	0,049
GRUPO 2					
19	0,357	0,529	0,116	0,645	0,047
34	0,344	0,524	0,147	0,670	0,061
25	0,326	0,505	0,135	0,640	0,042
15	0,324	0,510	0,117	0,627	0,050
26	0,340	0,505	0,129	0,634	0,047
16	0,341	0,537	0,114	0,651	0,039
20	0,335	0,499	0,130	0,629	0,039
30	0,337	0,534	0,116	0,650	0,036
GRUPO 3					
14	0,358	0,555	0,102	0,657	0,043
7	0,402	0,578	0,093	0,670	0,052
23	0,367	0,556	0,105	0,661	0,038
28	0,367	0,549	0,114	0,663	0,047
22	0,392	0,534	0,117	0,650	0,047
36	0,382	0,535	0,100	0,635	0,043
GRUPO 4					
11	0,335	0,448	0,164	0,612	0,042
29	0,351	0,441	0,133	0,574	0,030
3	0,366	0,471	0,124	0,595	0,033
32	0,320	0,450	0,128	0,579	0,040
41	0,359	0,460	0,121	0,581	0,046
17	0,355	0,470	0,123	0,593	0,029
GRUPO 5					
35	0,354	0,485	0,133	0,618	0,039
18	0,353	0,514	0,113	0,627	0,045
5	0,381	0,500	0,129	0,629	0,037
37	0,351	0,509	0,107	0,616	0,036
1	0,369	0,502	0,127	0,628	0,035
4	0,362	0,524	0,107	0,632	0,051
31	0,343	0,490	0,136	0,626	0,037
13	0,349	0,499	0,105	0,603	0,033
33	0,377	0,508	0,088	0,596	0,037

9	0,375	0,492	0,122	0,614	0,039
GRUPO 6					
39	0,331	0,558	0,135	0,693	0,082
12	0,363	0,615	0,116	0,732	0,061
2	0,346	0,575	0,105	0,680	0,059
40	0,351	0,606	0,105	0,711	0,070
6	0,365	0,544	0,152	0,696	0,054
27	0,334	0,550	0,129	0,680	0,035
10	0,332	0,557	0,134	0,690	0,046
8	0,372	0,608	0,104	0,712	0,045
24	0,339	0,570	0,101	0,671	0,043
21	0,352	0,558	0,120	0,679	0,043

Autoria própria, 2023

Analisando a variação espacial desses *clusters*, é perceptível uma proximidade principalmente nos Grupos 5 e 6. Já os demais *clusters* estão mais distantes e espalhados entre os demais agrupamentos (Figura 32).

Figura 32. Espacialização dos *clusters* das variáveis do IVDN

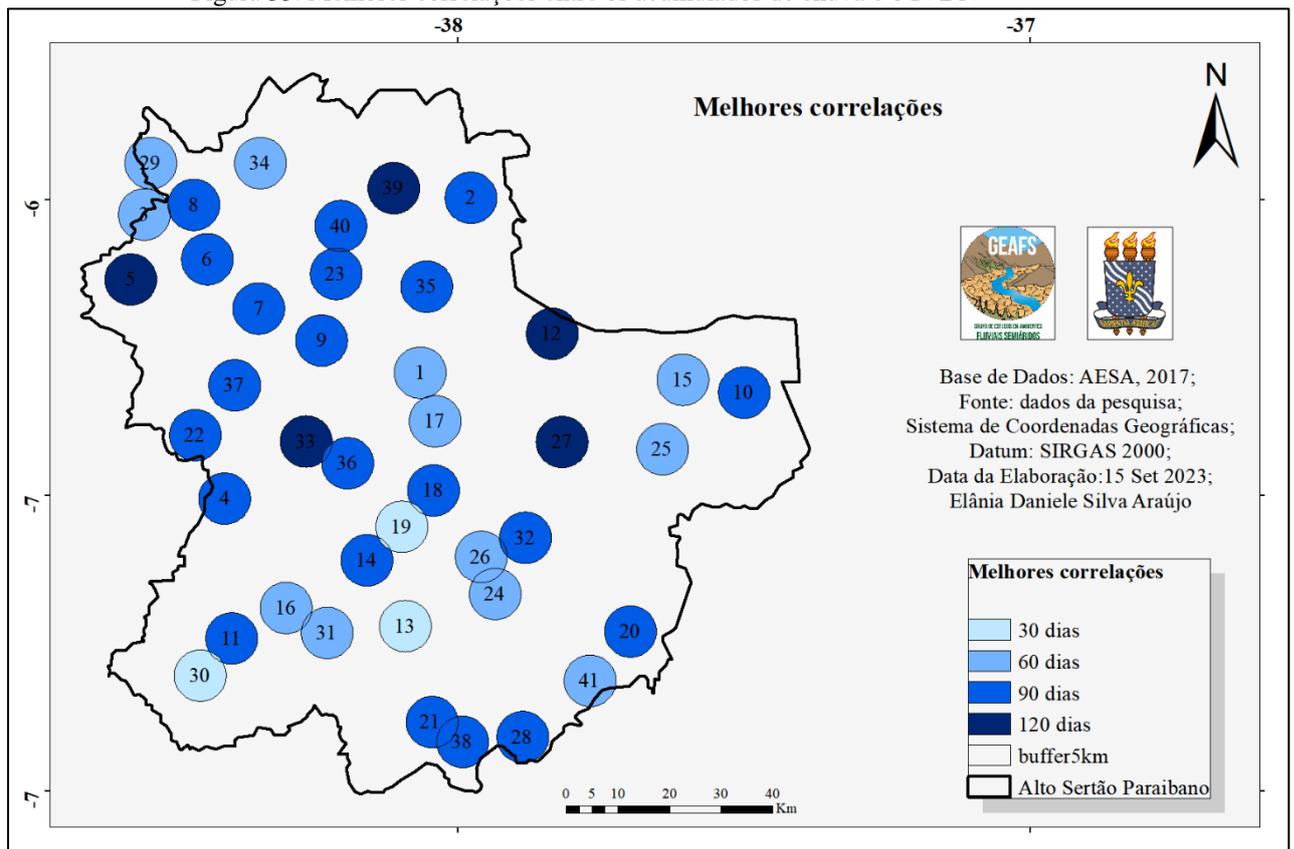


Autoria própria, 2023

3.5. Correlação entre a sazonalidade da vegetação e a precipitação

Foi feita uma correlação geral entre a precipitação e o IVDN, para toda a série histórica, desde 1994 até 2022, para essa obteve-se uma relação positiva fraca, com um $R=3,95$. Para as demais correlações, utilizou-se o acumulado de chuva antes do imageamento por satélite, assim foi gerado o acumulado 30, 60, 90, 120, 180 e 365 dias antes de cada imagem. Para a maioria das áreas, a melhor correlação foi de 90 dias, sendo 21 das 41 delas. 12 *buffers* apresentaram melhor correlação de 60 dias, 5 apresentaram uma melhor correlação de 120 dias e apenas 3 de 30 dias. Não houve melhores correlações para 180 ou 365 dias (Figura 33). Todas as correlações classificadas como Fortes ou Muito Fortes (CALLEGARI-JACQUES, 2009) estão destacadas em vermelho (Tabela 14).

Figura 33. Melhores correlações entre os acumulados de chuva e o IVDN



Autoria própria, 2023

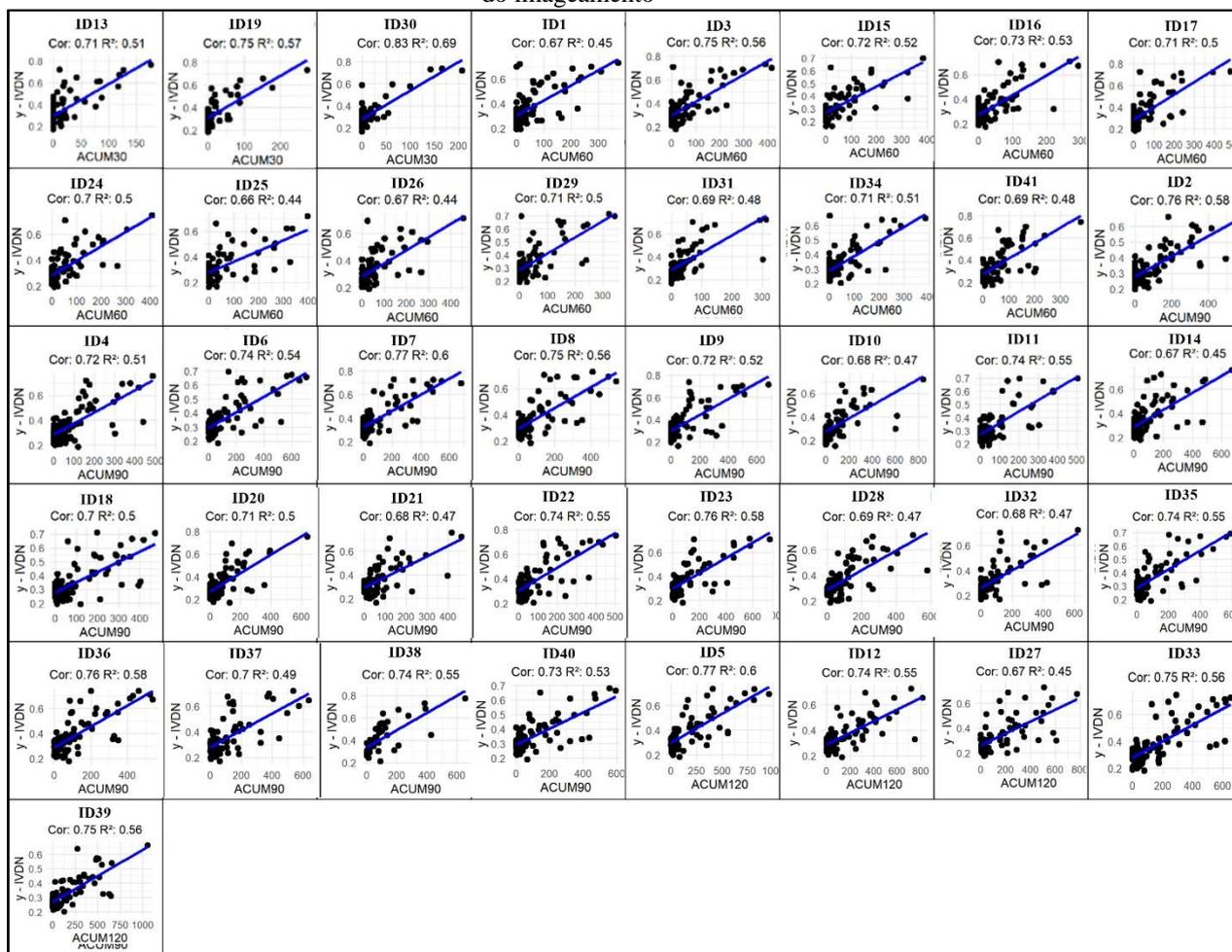
Tabela 14. Correlações entre o acumulado de chuva e o IVDN. Em vermelho valores acima de 0.6

ID	Correlações entre o acumulado de chuva e o IVDN							Melhor correlação
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	180 dias	365 dias	Maior valor	
1	0.620	0.672	0.639	0.656	0.490	0.144	0.672	60 dias
2	0.567	0.672	0.764	0.753	0.603	0.171	0.764	90 dias
3	0.706	0.750	0.749	0.726	0.567	0.209	0.750	60 dias
4	0.587	0.665	0.718	0.707	0.549	0.359	0.718	90 dias
5	0.513	0.643	0.768	0.772	0.668	0.401	0.772	120 dias
6	0.667	0.705	0.738	0.717	0.553	0.282	0.738	90 dias
7	0.580	0.699	0.774	0.751	0.637	0.221	0.774	90 dias
8	0.685	0.735	0.748	0.708	0.528	0.208	0.748	90 dias
9	0.604	0.634	0.722	0.710	0.590	0.276	0.722	90 dias
10	0.585	0.649	0.684	0.681	0.600	0.406	0.684	90 dias
11	0.615	0.704	0.741	0.686	0.480	0.200	0.741	90 dias
12	0.590	0.687	0.744	0.745	0.623	0.184	0.745	120 dias
13	0.712	0.624	0.600	0.569	0.374	0.160	0.712	30 dias
14	0.628	0.656	0.671	0.649	0.478	0.307	0.671	90 dias
15	0.647	0.718	0.711	0.711	0.589	0.248	0.718	60 dias
16	0.665	0.728	0.711	0.662	0.476	0.254	0.728	60 dias
17	0.690	0.708	0.698	0.703	0.559	0.240	0.708	60 dias
18	0.606	0.653	0.704	0.700	0.547	0.188	0.704	90 dias
19	0.753	0.683	0.652	0.580	0.351	0.171	0.753	30 dias
20	0.673	0.669	0.710	0.705	0.558	0.187	0.710	90 dias
21	0.626	0.647	0.682	0.648	0.455	0.154	0.682	90 dias
22	0.589	0.682	0.744	0.737	0.626	0.387	0.744	90 dias
23	0.643	0.689	0.763	0.751	0.576	0.223	0.763	90 dias
24	0.664	0.704	0.701	0.631	0.438	0.216	0.704	60 dias
25	0.651	0.662	0.648	0.645	0.511	0.232	0.662	60 dias
26	0.621	0.666	0.649	0.604	0.444	0.259	0.666	60 dias
27	0.578	0.610	0.648	0.670	0.542	0.200	0.670	120 dias
28	0.630	0.602	0.689	0.669	0.580	0.352	0.689	90 dias
29	0.649	0.706	0.705	0.693	0.496	0.179	0.706	60 dias
30	0.832	0.718	0.699	0.645	0.349	0.044	0.832	30 dias
31	0.673	0.690	0.671	0.628	0.439	0.312	0.690	60 dias
32	0.588	0.643	0.684	0.677	0.546	0.269	0.684	90 dias
33	0.500	0.638	0.734	0.751	0.569	0.243	0.751	120 dias
34	0.661	0.714	0.714	0.676	0.507	0.112	0.714	60 dias
35	0.545	0.665	0.741	0.726	0.582	0.122	0.741	90 dias
36	0.625	0.711	0.763	0.756	0.608	0.290	0.763	90 dias
37	0.624	0.691	0.700	0.676	0.494	0.244	0.700	90 dias
38	0.637	0.719	0.741	0.683	0.503	0.225	0.741	90 dias
39	0.590	0.664	0.746	0.747	0.619	0.128	0.747	120 dias
40	0.636	0.656	0.726	0.701	0.524	0.041	0.726	90 dias
41	0.685	0.693	0.689	0.675	0.610	0.353	0.693	60 dias
Média:	0,633	0,679	0,709	0,690	0,533	0,229	-	-

Autoria própria, 2023

Para a correlação de 30 dias apenas 3 *buffers* apresentaram um maior valor, foram eles: ID13 com um valor de 0,712; ID19 com 0,752 e ID30, que chamou atenção por ser o maior valor encontrado dentre todas as correlações, de 0,832. Para a correlação de 60 dias, 12 áreas apresentaram maiores valores, sendo o maior valor encontrado no ID3 de 0,750. Além desse, outros 6 *buffers* apresentaram valores acima de 0,7 e 5 apresentaram valores acima de 0,6. Como já dito anteriormente, 21 áreas apresentaram maior correlação para o acumulado de 90 dias. 16 apresentaram valores a partir de 0,7, sendo o maior deles de 0,774 do *buffer* de ID número 7, os outros 5 apresentaram valores a partir de 0,6. Para as correlações de 120 dias, 5 *buffers* apresentaram maiores valores: ID's 5, 12, 27, 33 e 39, com os valores de 0,772, 0,744, 0,670, 0,751 e 0,747, respectivamente. O maior valor foi o do ID5 (Figura 34).

Figura 34. Melhores Correlações entre IVDN e acumulados de precipitação para 30, 60,90 e 120 dias antes do imageamento



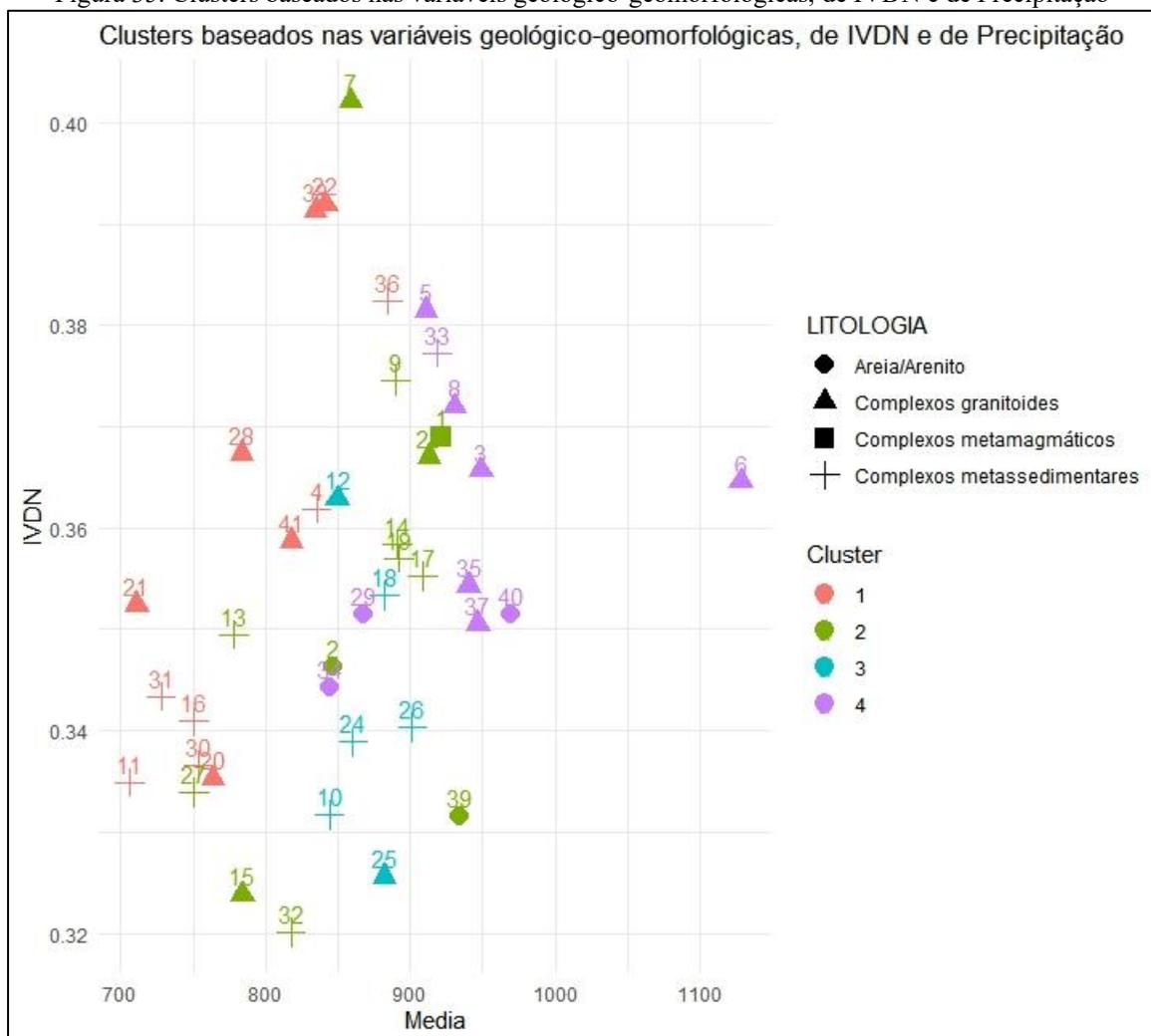
Autoria própria, 2023

3.6. Regressões

3.6.1. Análise de *Clustering* para todas as variáveis

Antes de efetuar as análises de regressão, foi efetuada outra análise de *clustering*, dessa vez, baseada nas variáveis geológico-geomorfológicas, de precipitação e de IVDN, a fim de identificar se há uma homogeneidade entre essas áreas, levando em consideração o conjunto das variáveis. Assim, foram encontrados quatro *clusters*. O primeiro contém 12 *buffers* e está representado na cor vermelha, o segundo, de cor verde, contém 13 *buffers*, o terceiro abarcou 6 *buffers* e está especializado na cor azul e o quarto, representado de lilás, contém 10 (Figura 35). Posteriormente, as regressões foram geradas para cada *clusterização*.

Figura 35. Clusters baseados nas variáveis geológico-geomorfológicas, de IVDN e de Precipitação



Autoria própria, 2023

No grupo 1, estão contidos 12 *buffers*, nele predominam altas altitudes, com exceção do ID16, que apresentou uma altitude de 384m. As declividades foram médias e altas, e os ITU's foram predominantemente baixos, 6 deles estão classificados como complexos granitoides e 6 como metassedimentares. A maioria das áreas desse grupo apresentou médias históricas de precipitação mais baixas. Quanto ao IVDN, quatro das maiores médias estão nesse grupo, são elas pertencentes aos IDs 22, 28, 36 e 38, mas também podem ser encontradas médias baixas e intermediárias. A maioria dos *buffers* desse grupo apresentaram correlação para 90 dias.

No grupo 2, predominam baixas e médias altitudes, com exceção do ID9 que apresentou uma altitude de 448m. As declividades, litologias e ITU's foram variados. As médias de precipitação também variaram, sendo a maior de 933,6mm pertencente ao ID39 e a menor de 750,3 no ID27. Os valores de IVDN também variaram, estando a maior média encontrada (0,402) pertencente a esse grupo, no ID6. Todas as áreas estão classificadas como complexos granitoides e a maioria teve uma melhor correlação para 90 dias.

O grupo 3, abarcou 6 *buffers* com altitudes médias e baixas, declividades e ITU's variados, estão classificados como complexos metassedimentares, com exceção dos IDs 12 e 25 que estão dentro dos complexos granitoides. Nesse grupo predominam baixas médias de IVDN e valores médios de precipitação. As correlações foram variadas.

No grupo 4, estão inseridas 10 áreas, com altitudes variadas, há o predomínio de declividades baixas e valores de ITU altos, com exceção do ID33 que foi classificado como baixo (6,12). A litologia desse grupo também variou muito, podendo ser encontrado areia/arenito, complexos granitoides e metassedimentares. Predominam valores médios e altos de IVDN e as maiores médias de precipitação, as correlações também variaram.

É possível encontrar semelhança entre os grupos que foram feitos a partir das características separadas e os que foram agrupados utilizando todas as variáveis juntas. O Grupo 1 da *clusterização* geológico-geomorfológica está predominantemente no grupo 1 que abarcou todas as variáveis, bem como o grupo 1 da *clusterização* baseada nas características da vegetação, que predominantemente está dentro do grupo 1 da *clusterização* geral (incluindo todas as variáveis) e todo o grupo 1 do agrupamento baseado nas características da precipitação, está dentro do grupo 1 da *clusterização* o geral. O grupo 1 é o exemplo mais representativo, mas é possível identificar essa tendência para os demais grupos (Tabela 15).

Tabela 15. Clusters das variáveis geológico-geomorfológicas, de IVDN e Precipitação

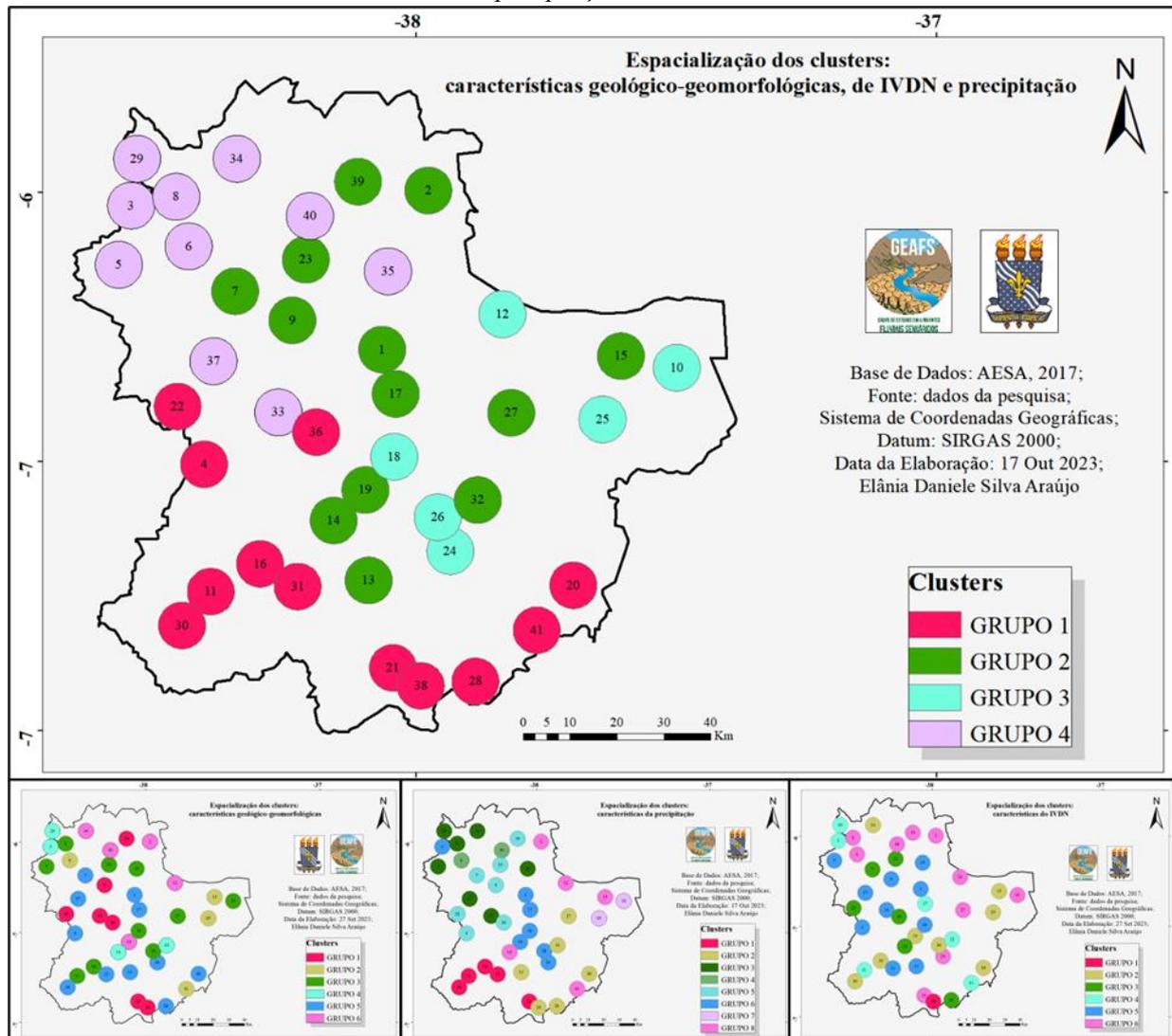
ID	Geológico-geomorfológica	Precipitação	Vegetação
GRUPO 1			
21	GRUPO 1	GRUPO 1	GRUPO 6
22	GRUPO 1	GRUPO 5	GRUPO 3
36	GRUPO 1	GRUPO 5	GRUPO 3
38	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 1
11	GRUPO 3	GRUPO 1	GRUPO 4
16	GRUPO 3	GRUPO 1	GRUPO 2
4	GRUPO 5	GRUPO 5	GRUPO 5
20	GRUPO 5	GRUPO 2	GRUPO 2
28	GRUPO 5	GRUPO 2	GRUPO 3
30	GRUPO 5	GRUPO 1	GRUPO 2
31	GRUPO 5	GRUPO 1	GRUPO 5
41	GRUPO 5	GRUPO 8	GRUPO 4
GRUPO 2			
9	GRUPO 1	GRUPO 5	GRUPO 5
15	GRUPO 2	GRUPO 8	GRUPO 2
23	GRUPO 3	GRUPO 5	GRUPO 3
27	GRUPO 3	GRUPO 2	GRUPO 6
14	GRUPO 4	GRUPO 8	GRUPO 3
32	GRUPO 4	GRUPO 2	GRUPO 4
1	GRUPO 5	GRUPO 6	GRUPO 5
7	GRUPO 5	GRUPO 5	GRUPO 3
13	GRUPO 5	GRUPO 2	GRUPO 5
17	GRUPO 5	GRUPO 6	GRUPO 4
2	GRUPO 6	GRUPO 8	GRUPO 6
19	GRUPO 6	GRUPO 6	GRUPO 2
39	GRUPO 6	GRUPO 5	GRUPO 6
GRUPO 3			
25	GRUPO 2	GRUPO 7	GRUPO 2
10	GRUPO 3	GRUPO 7	GRUPO 6
18	GRUPO 3	GRUPO 6	GRUPO 5
26	GRUPO 3	GRUPO 6	GRUPO 2
24	GRUPO 5	GRUPO 6	GRUPO 6
12	GRUPO 6	GRUPO 8	GRUPO 6
GRUPO 4			
33	GRUPO 1	GRUPO 3	GRUPO 5
6	GRUPO 2	GRUPO 4	GRUPO 6
40	GRUPO 2	GRUPO 4	GRUPO 6
5	GRUPO 3	GRUPO 3	GRUPO 5
8	GRUPO 3	GRUPO 3	GRUPO 6
35	GRUPO 3	GRUPO 3	GRUPO 5
3	GRUPO 4	GRUPO 6	GRUPO 4
29	GRUPO 4	GRUPO 3	GRUPO 4
37	GRUPO 5	GRUPO 3	GRUPO 5
34	GRUPO 6	GRUPO 3	GRUPO 2

Autoria própria, 2023

Espacialmente, essa foi a *clusterização* em que mais houve proximidade entre os *buffers* de cada agrupamento. É possível notar uma proximidade entre todos os *clusters*, o grupo 1 predomina na parte sul do mapa, o grupo 2 se encontra mais na área central, com

exceção dos IDs 32, 27 e 15 que estão mais a oeste. O grupo 3 aparece na área central e mais a oeste e o grupo 4 está mais a noroeste, com exceção dos IDs 35 e 37 que estão mais distantes (Figura 36).

Figura 36. Espacialização dos *clusters* baseados nas características geológico-geomorfológicas, de IVDN e precipitação



Autoria própria, 2024

3.6.2. Regressões por *cluster*

Após ser observado que existe uma homogeneização entre as áreas, levando em consideração dados geológico-geomorfológicos, de precipitação e da vegetação, buscou-se entender como cada grupo se comporta a partir da quantidade de chuva acumulada, para tanto, efetuou-se a regressão linear entre os dados de IVDN e acumulado de precipitação, levando em consideração cada grupo gerado em cada *clusterização*. Os acumulados

usados, foram aqueles que apresentaram melhor correlação com IVDN para cada *buffer* individualmente.

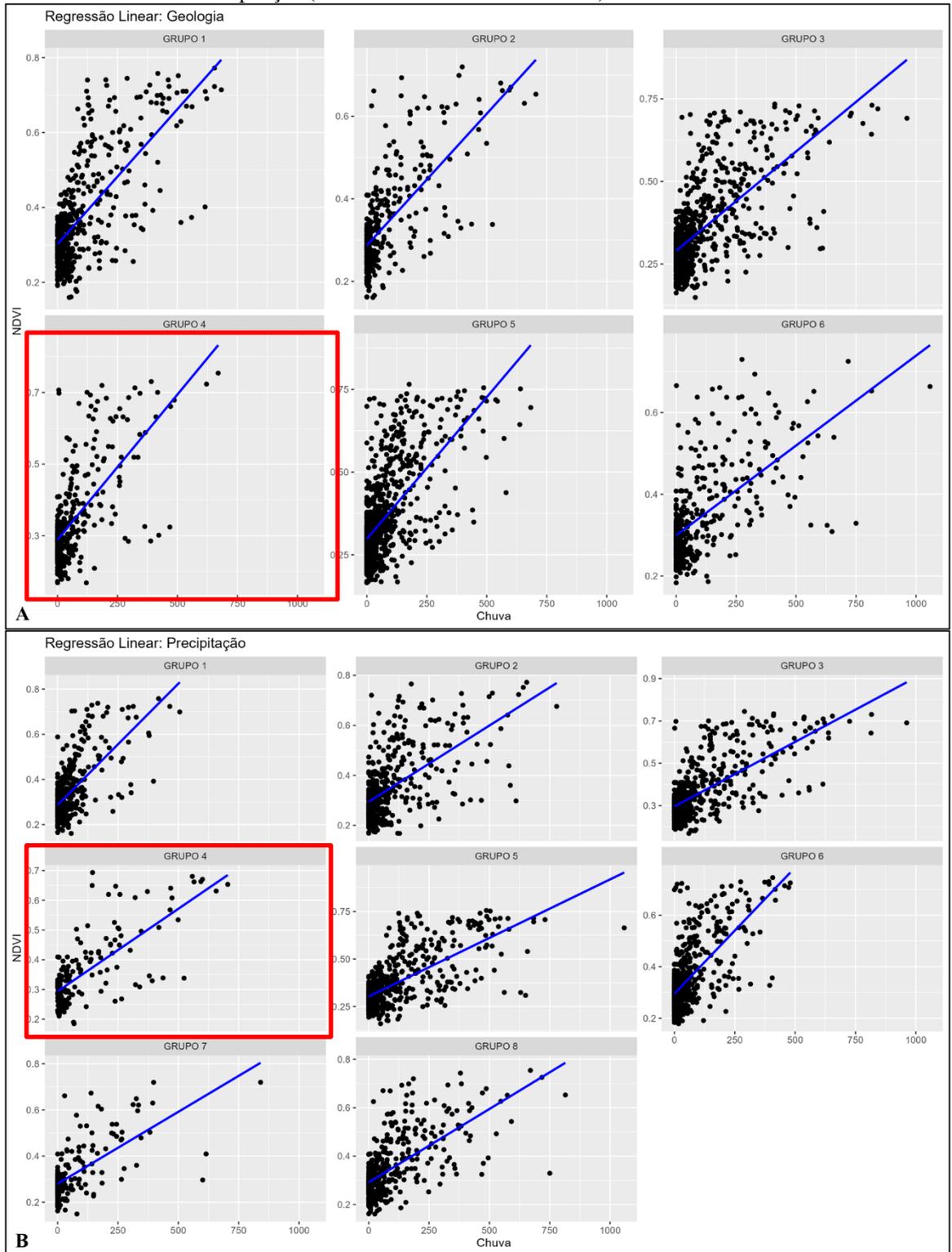
Para a primeira clusterização, referente as características geológico-geomorfológicas foram obtidos seis grupos, o maior R² foi do Grupo 1, com 0,506. Na segunda clusterização, referente aos dados de precipitação o maior coeficiente foi de 0,538, pertencente ao grupo 4. Na terceira, o grupo 1 se destaca com um R² de 0,548, mas como nele tem apenas um *buffer*, optou-se por destacar também o grupo 3, que apresentou o segundo maior coeficiente de 0,527. E por fim, na *clusterização* em que foram utilizadas todas as variáveis, o maior coeficiente e determinação foi de 0,487, referente ao grupo 4 (Tabela16; Figura 37 A e B e 38 A e B).

Tabela 16. Coeficientes de determinação (R²) por *clusterização* (em azul os maiores valores)

Regressões							
Geologia	R ²	Chuva	R ²	Vegetação	R ²	Todos	R ²
GRUPO 1	0,506	GRUPO 1	0,444	GRUPO 1	0,548	GRUPO 1	0,480
GRUPO 2	0,486	GRUPO 2	0,354	GRUPO 2	0,433	GRUPO 2	0,375
GRUPO 3	0,461	GRUPO 3	0,493	GRUPO 3	0,527	GRUPO 3	0,427
GRUPO 4	0,435	GRUPO 4	0,538	GRUPO 4	0,454	GRUPO 4	0,487
GRUPO 5	0,423	GRUPO 5	0,460	GRUPO 5	0,424		
GRUPO 6	0,389	GRUPO 6	0,445	GRUPO 6	0,443		
		GRUPO 7	0,429				
		GRUPO 8	0,43				

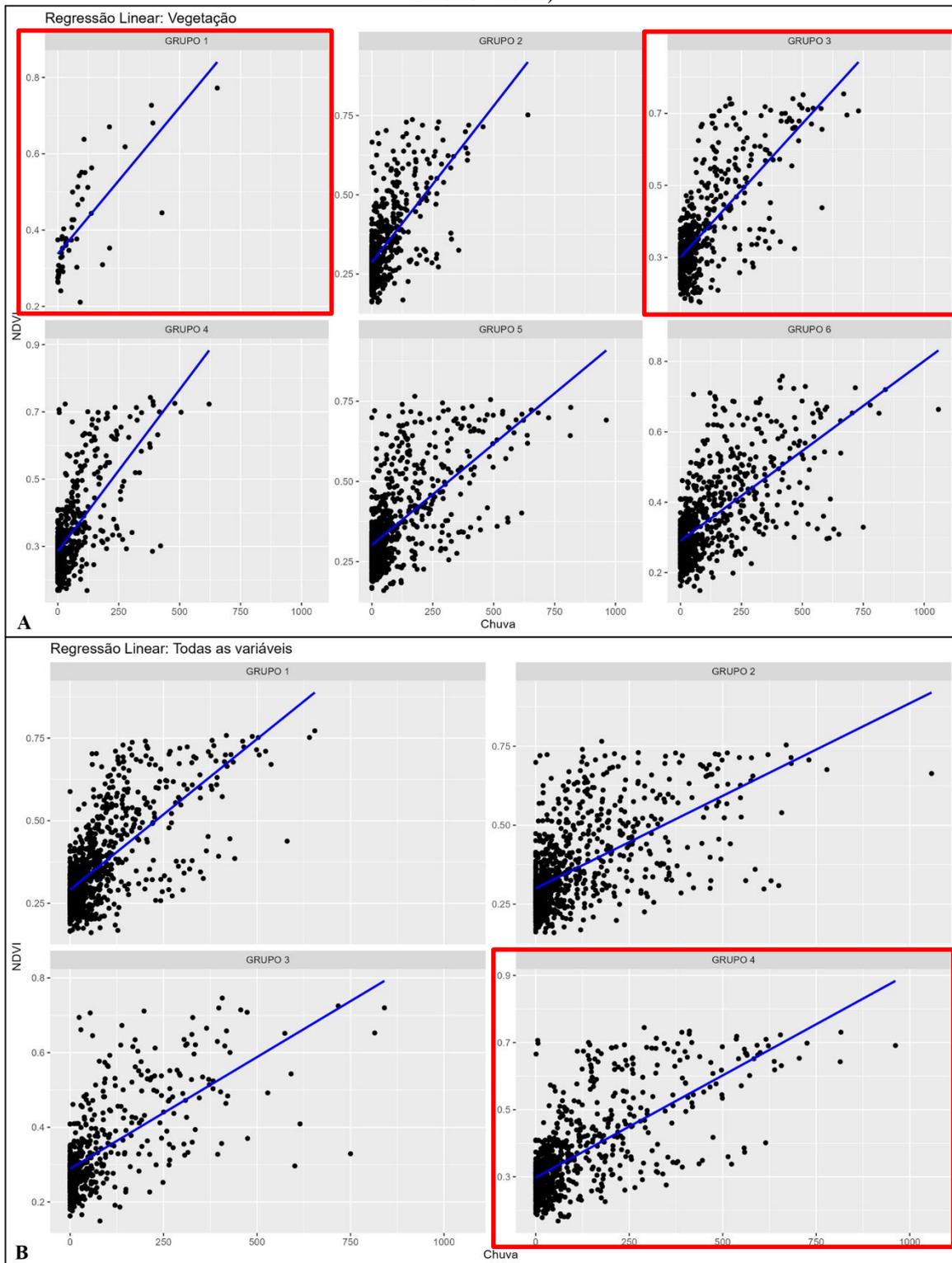
Autoria própria, 2024

Figura 37. A. Regressões para as variáveis geológico-geomorfológicas. B. Regressões para as variáveis de Precipitação (em vermelho os maiores valores)



Autoria própria, 2024

Figura 38.A. Regressões para as variáveis do IVDN. B. Regressões para todas as variáveis (em vermelho os maiores valores)



Autoria própria, 2023

Em todas as *clusterizações* que apresentaram R^2 maiores, destacam-se *buffers* com IVDN altos e médios (valores referentes as médias) as amplitudes e os valores máximos, sempre se mantiveram entre altos e médios também, variando mais nos Grupos 1

(geológico-geomorfológica) e 4 (Todas as variáveis). As altitudes, declividades e ITU's variaram entre as quatro *clusterizações*, com valores altos e médios na geológico-geomorfológica e de vegetação, já para Precipitação e Todas as variáveis os valores foram médios e baixos. As médias de precipitação se mantiveram médias e altas em todas as *clusterizações* e predominou em todas elas maiores correlações para 90 dias. Com relação a litologia, as três primeiras *clusterizações* apresentaram semelhança, com áreas inseridas principalmente nos complexos granitoide e metassedimentar, já a última (Todas as variáveis) apresentou uma variação, incluindo também parte das áreas classificadas como areia/arenito.

CAPÍTULO IV



DISCUSSÃO

Entender o comportamento de uma FTSS é uma tarefa árdua e complexa, visto que vários componentes ambientais interferem em sua resposta. Exatamente por esse motivo, que nesta pesquisa houve uma preocupação em entender as características e o comportamento de outras variáveis como a litologia, a altitude, a declividade, a umidade topográfica e a precipitação, essa última se apresentou como a variável que mais tem influência no índice de vegetação.

4.3. Influência dos parâmetros Geológicos-Geomorfológicos

A análise das características geológico-geomorfológicas, por meio da *clusterização*, permitiu identificar a diferenciação entre as áreas com geologia sedimentar e cristalina, o que ocorre devido aos tipos de solos diferentes que são oriundos dessas geologias. Assim, foram criados 6 grupos, com características litológicas, de altitude, declividade e ITU semelhantes. Por haver uma lacuna nos dados de solo para a Caatinga e o mapeamento existente ser muito genérico, buscou-se minimizá-la a partir do uso dos dados da litologia/geologia, que são disponibilizados em uma escala maior. As áreas de geologia sedimentar são as que favorecem a infiltração da água proporcionando solos mais úmidos, enquanto as áreas cristalinas favorecem ao escoamento superficial (CÔRREA, SOUZA e CAVALCANTI, 2014). De acordo com Covelo *et al.* (2017) e Munoz *et al.*, (2023) o conteúdo de água no solo se configura como um dos principais fatores potencialmente impulsionadores das diferenças no desenvolvimento das FTSS.

Isso reflete no vigor da vegetação, foi possível identificar, a partir das observações em campo, que a maioria das áreas classificadas como Areia/Arenito, pertencentes ao grupo 6, foram também as que estiveram verdes mesmo no período seco, embora esses não tenham apresentado as maiores médias de IVDN, mas preservaram as folhas verdes mesmo fora da estação chuvosa. Enquanto as áreas de complexo granitoide, inseridas principalmente no grupo 1, apresentaram as maiores médias, mas perderam as folhas no período seco. Jesus *et al.* (2022) observaram a relação entre a litologia e os dados de IVDN para uma área de Caatinga na Bahia, mas encontraram resultados diferentes, os autores constataram que as áreas de Arenito foram as que apresentaram maiores médias de IVDN, chegando a um valor de 0,79, seguido por Calcário que também é classificada como rocha sedimentar e apresentou uma média de 0,72, enquanto as áreas de granitoides apresentaram valores mais baixos.

Sabe-se que por si só a litologia não explica o comportamento das FTSS, mas na perspectiva de uma análise sistêmica terá sua contribuição. Munoz *et al.* (2023) também comparou o desenvolvimento de uma FTSS no México em áreas de Calcário e Filito Siliclástico e apesar de não usar índice de vegetação, avaliaram parâmetros como biomassa acima do solo, altura do dossel, área basal, densidade de árvores e riqueza de espécies, ao longo de 12 anos e constataram que a vegetação desenvolvida nas áreas de Calcário apresentou valores mais elevados para todos os parâmetros, exceto na altura do dossel. Akinwumiju e Olorunfemi (2023) ao analisarem a influência da geoquímica e da topografia na vegetação na Nigéria, explicam que a geoquímica do leito rochoso e a espessura do solo exercem mais influência no padrão da vegetação do que a própria topografia.

Além da litologia, a altitude, a declividade e o ITU são variáveis importantes e que de certa forma, se complementam para proporcionar o entendimento do comportamento da vegetação em uma FTSS. Constatou-se que as maiores médias de IVDN estão nas áreas onde estão as maiores médias de declividade, e que foram classificadas como grupo 1. Essas áreas nem sempre terão as maiores altitudes, mas terão os menores valores de ITU, isso explica o fato de não haver uma maior umidade no ambiente, pois não há acúmulo de água nessas áreas, fazendo com que essas áreas estejam mais secas e sem folhas no período seco, diferente das áreas sedimentares e de menor declividade que apresentaram folhas e estiveram verde mesmo no período seco.

Por outro lado, essas áreas por serem mais declivosas e de difícil acesso, não favorecem o uso da terra para atividades antrópicas, isso explica os altos valores de IVDN, fazendo com que sejam áreas mais preservadas. Birhanu *et al.* (2021) analisaram a vegetação de uma Floresta Seca na Etiópia por meio de clusterização pelo Método Hierárquico e encontraram cinco grupos com diferentes composições florísticas, influenciadas pela altitude e pela declividade. Os autores constataram que a altitude e a umidade do solo tiveram uma influência significativa no desenvolvimento das plantas e na distribuição dessas. Os autores também identificaram que as áreas mais altas e declivosas apresentaram uma maior diversidade de espécies. Méndez-Toribio *et al.* (2016) analisaram uma FTSS no México por meio de Modelos Lineares Gerais (GLMs) e constataram que a vegetação localizada em áreas com maior declividade apresentou maior diversidade, densidade e altura do dossel. Corroborando com a ideia de que as atividades humanas se concentram nas áreas mais baixas e menos declivosas, onde há melhores condições de acesso e de água, isso permite o entendimento de que a diferenciação florística nas diferentes declividades está relacionada com o histórico das atividades antrópicas.

Ao analisarem uma área em Xinjiang, na China, Wang e Cheng (2023) também constaram a influência da geomorfologia no padrão de uso da terra, segundo os autores a altitude, a declividade e o ITU foram considerados fatores importantes que afetam a diversidade e os padrões de uso/cobertura da terra. Araújo, Souza e Machado (2021) também encontraram resultados semelhantes entre a relação da declividade, altitude e ITU e a vegetação de Caatinga na Paraíba. Os autores identificaram que as áreas de serras com altitudes e declividade mais elevadas apresentaram uma vegetação mais densa e preservada, enquanto as áreas mais baixas e menos declivosas eram mais degradadas e que o ITU não teve uma boa correlação com a vegetação das áreas serranas, por estar relacionado à área de captação de água, que em áreas mais altas e declivosas é menor, resultados semelhantes ao encontrados nos grupos 2 e 6 da *clusterização* aqui efetuada.

Ao efetuarem uma análise de *clustering* usando o *K-means*, Rami *et al.* (2022) chegaram a um resultado de agrupamentos semelhantes ao dessa pesquisa, eles encontraram cinco agrupamentos a partir dos dados de altitude, declividade e precipitação, nesses agrupamentos as altitudes e declividades altas estiveram em um grupo, altitudes e declividades baixas em outro grupo, altitudes e declividades médias em outro grupo, além de um grupo com altitude baixa, mas com alta declividade e um de altitude moderada e declividades médias. Castillo *et al.* (2021), também usando o *K-means*, utilizaram a altitude, a declividade, a litologia, precipitação, vegetação, dados de solo, evapotranspiração e outras variáveis para o agrupamento. Embora seu objetivo fosse identificar os principais fatores que determinam os processos de recarga e potenciais áreas de recarga de água subterrâneas, o que difere dos objetivos aqui apresentados, eles obtiveram três grupos, um que abarcou declives baixos, altitudes mais baixas e dois tipos de litologia, um com declividades medias e altitudes médias e um com as maiores altitudes e declividades.

4.4. Análise da variabilidade da precipitação

A precipitação é um fator determinante para a análise do comportamento das FTSS, devido a influência que essa exerce nos arranjos vegetais que se adaptam a quantidade de chuva que ocorre de forma irregular nos ambientes semiáridos tropicais. Para essas áreas, não apenas os dias chuvosos interferem no comportamento da vegetação, mas os dias sem chuva também. Por isso, analisou-se não apenas a precipitação anual e acumulada nessa pesquisa, utilizou-se também as médias dos dias chuvosos e sem chuvas, e baseado nesses dados foi feita uma análise de *clustering* para identificar áreas com o mesmo padrão de

precipitação e relacionar com os dados de vegetação. Assim como efetuou-se com os dados geológico-geomorfológicos. Desse modo, 8 grupos foram identificados.

Para o Alto Sertão paraibano, algumas áreas tiveram médias anuais mais altas, assim como os valores máximos, a maior quantidade de médias de NDC e de NDCE e por sua vez a menor média de NDCSC e NDCSCE, essas áreas, foram classificadas como grupo 3 e 4 na *clusterização* dos dados de precipitação. Também apresentaram uma maior distribuição com relação ao SPI e suas categorias de umidade, não concentrando a maioria dos anos apenas na categoria habitual. Foi possível notar que essas áreas apresentaram altitudes baixas, declividade médias e baixas e altos valores de ITU.

Relacionando com os valores de IVDN, não necessariamente encontrou-se os maiores valores médios anuais de precipitação relacionados com os maiores valores de IVDN, apresentando uma correlação positiva fraca entre essas variáveis. Isso não significa dizer que a chuva não tem uma considerável influência no comportamento da vegetação de Caatinga, pois a variabilidade inter e intra-anual terão uma influência muito forte.

Ao analisarem a resposta da Caatinga enquanto FTSS, Souza *et al.* (2016), encontraram uma resposta não linear dos valores de IVDN para às chuvas anuais, os autores afirmaram que o crescimento da vegetação quase não foi afetado abaixo de um limiar de precipitação anual de 650 mm. Assim, eles explicam que essa resposta de uma menor variabilidade interanual do comportamento da vegetação em comparação com a das chuvas sugere a capacidade de armazenamento de água no solo ou mesmo nas plantas para resistir e se adaptar a condições adversas de seca. Num estudo efetuado na Nigéria, Adeniyi (2014) afirma que a vegetação não depende apenas da quantidade sazonal ou anual de precipitação, mas também da frequência e distribuição dos dias chuvosos durante os seus diferentes estágios de desenvolvimento.

Porém, Souza e Hooke (2021) ao efetuarem uma correlação entre os dados de chuva e IVDN para a Caatinga, perceberam que o acumulado de 365 dias antes também interfere na resposta do índice, eles afirmam que se o ano for mais seco ou de maior precipitação anteriormente, irá refletir no comportamento da vegetação no próximo ciclo anual. Jesus *et al.* (2020) afirmam que eventos sazonais, como o El niño e La niña, também influenciam na resposta do IVDN.

Os grupos 1 e 2 apresentaram as menores médias anuais, bem como os menores valores máximos e menor quantidade de médias de NDC e de NDCE e maior média de NDCSC e NDCSCE, predominantemente essas áreas obtiveram baixas médias de IVDN, suas altitudes e declividades foram mais altas e os ITU's variados. Os grupos 5, 7 e 8 foram

de valores intermediários e o 6 se destaca por apresentar valores altos das variáveis de precipitação, mas os valores das outras variáveis (geológico-geomorfológica e de IVDN) foram diversificados

Rami *et al.* (2022) fizeram uma análise de *clustering* usando dados de precipitação, altitude e declividade e, também obtiveram resultados em que áreas com precipitações altas, médias e baixas foram agrupadas em *clusters* diferentes. Adeniyi (2014) tinham por objetivo analisar a homogeneidade espacial da precipitação diária na Nigéria e encontraram 5 agrupamentos. Santos *et al.* (2019) utilizaram o método hierárquico para analisar a precipitação da Paraíba entre os anos de 1998 e 2015 e encontraram 4 *clusters* com tendências homogêneas de precipitação. Apesar de terem objetivos diferentes, esses estudos utilizaram a análise de *clustering* para o entendimento do comportamento da precipitação em diferentes regiões geográficas, nesse estudo, o Alto Sertão, foi agrupado juntamente com o Sertão e a Borborema em um mesmo *cluster*.

4.5. Análise geral da sazonalidade da vegetação

As análises do IVDN ao longo da série temporal de 1994 a 2022 apontaram médias que variaram de 0,300 a 0,402 para os *buffers* analisados, ressalta-se que esses valores são referentes apenas a vegetação nativa de Caatinga, pois foram utilizados os dados de classificação do Mapbiomas. Esses valores estão distribuídos em 6 *clusters*, com altitudes, declividades, litologias e grau de conservação diferentes, o que torna a análise dessa vegetação ainda mais complexa e desafiadora. Os *buffers* que apresentaram as maiores médias foram classificados como grupos 1 e 3 na *clusterização* efetuada com os dados do índice, esses apresentaram uma vegetação densa, preservada e com variação de espécies, algumas delas apresentaram folhas mesmo no período seco. Enquanto, o grupo 2, contém aqueles *buffers* com as menores médias, esses apresentaram uma vegetação mais degradada, sem muita diversidade de espécies. Jesus *et al.* (2020) e Brito, Santos e Morais (2020) também observaram que as áreas mais preservadas apresentam valores de IVDN mais altos, enquanto as áreas mais degradadas são representadas por valores mais baixos. Os grupos 4 e 5 apresentam valores médios e o grupo 6, valores variados.

Silveira *et al.* (2022) encontraram valores de IVDN que variaram entre 0,200 e 0,400 para um intervalo de 20 anos para uma área de bacia hidrográfica no estado de Pernambuco, os autores analisaram imagens de 1998, 2008 e 2018 para o período seco. Brito, Santos e Morais (2020) também encontraram resultados semelhantes ao efetuarem

uma análise no município de Petrolina para os períodos chuvoso e seco, encontrando os variações nos valores de 0,300 e 0,400 e 0,200 a 0,300, respectivamente.

Ao analisarem a vegetação no município de Caruaru, Almeida *et al.* (2018) encontraram valores de 0,240 a 0,300 para áreas degradadas e valores acima de 0,440 para áreas conservadas. Enquanto Caetano *et al.* (2022) classificaram, em uma área no semiárido baiano áreas com valores abaixo de 0,500 como Caatinga Hiperxerófila, enquanto os valores acima de 0,500, segundo os autores, poderiam representar áreas de savana estépica ou áreas irrigadas, o objetivo da pesquisa aqui desenvolvida não é o de classificação dessas áreas, visto que é uma tarefa muito complexa e que se deve levar em consideração outros parâmetros e principalmente um levantamento de campo bem elaborado.

No final do período chuvoso para o ano de 2018, Oliveira, Silva Filho e Costa (2021), chegaram a encontrar valores que variaram de 0,470 a 0,870 para a Caatinga no município de Caicó e Menezes, Oliveira e Freitas (2023) também para a Caatinga, encontraram uma variação de 0,300 a 0,800 nos valores de IVDN. Ao efetuarem uma análise entre os anos 2000 e 2011 Burry *et al.* (2018) encontraram valores médios entre 0,430 e 0,630 para florestas secas na Argentina.

Vale salientar que os valores encontrados na maioria desses estudos, referem-se à variação entre determinados períodos, geralmente períodos mais curtos até mesmo dentro de um mesmo ano, ou comparação entre períodos secos e chuvosos, não retratam a média dos valores. Além disso, as classificações feitas a partir do índice de vegetação, levam em consideração outras classes como água, solo exposto, agricultura, diferentemente do que se busca na presente pesquisa, na qual foram utilizados apenas dados referentes a vegetação de Caatinga, definidas pelo Mapbiomas, a partir da média das 88 imagens englobando tanto períodos secos quanto chuvosos num intervalo de 1994 a 2022.

Portanto, salienta-se que as médias variando entre 0,300 e 0,402 apenas referente a vegetação de Caatinga ao longo desse período, podem ser consideradas altas, levando em consideração a sazonalidade e a complexidade dessa vegetação, reafirmando que tal vegetação é enquadrada na classificação de Floresta Secas, visto que seus valores máximos variaram de 0,574 a 0,732 ao longo desse período e a maioria das áreas apresentaram valores acima de 0,600. Valores semelhantes aos encontrados por Souza e Hooke (2021) ao analisarem a vegetação em uma Bacia Hidrográfica no semiárido da Paraíba.

Com relação aos valores de amplitude, foi encontrada uma variação entre 0,441 e 0,615 para os *buffers* analisados e o desvio padrão variou entre 0,082 e 0,029. A análise da

amplitude é importante para entender questões fenológicas e de sazonalidade, além disso, variações na amplitude podem indicar mudanças ambientais como desmatamento, expansão urbana e outras atividades antrópicas.

Os *buffers* que apresentaram uma maior amplitude, apresentaram também os maiores valores máximos e os maiores valores de desvio padrão, alguns deles apresentaram também as maiores médias, outros não. O que significa dizer que não necessariamente uma alta amplitude estará relacionada a distúrbios ambientais causados por atividades antrópicas, mas as próprias variações sazonais e fenológicas das áreas. Juntos, esses três aspectos podem apontar para uma área com características fenológicas distintas, onde a vegetação passa por ciclos de crescimento bem definidos, responde a diferentes condições ambientais e exibe uma diversidade de tipos de vegetação. Além disso, a presença de valores máximos elevados sugere que a área pode apresentar condições que promovem o vigor da vegetação em determinados momentos. É importante que estudos futuros investiguem questões fitossociológicas e correlacionem com esses dados para um melhor entendimento do comportamento das FTSS.

Ao analisar a amplitude de florestas secas e úmidas da América Central e do Sul, a partir de dados de IVDN, Gerard *et al.* (2020), explicam que um comportamento sincronizado da vegetação, ou seja, a variação nas características ambientais e climáticas, e a diversidade das espécies de plantas em termos das suas diferentes estratégias de ciclo de vida foliar (comportamentos fenológicos das folhas) podem explicar os altos valores da amplitude. Os autores afirmam que essa sincronia acontece quando o ciclo de vida foliar de comunidades vegetais inteiras é impulsionado pelos mesmos fatores ambientais e climatológicos, produzindo um alto valor de amplitude. Os pesquisadores encontraram locais com espécies com um fluxo foliar e queda de folhas não sincronizados e tiveram as amplitudes mais baixas, encontraram também locais que apresentam uma mistura de comportamento sincronizado com comportamento não sincronizado ou aqueles com espécies perenes que apresentaram amplitudes na faixa intermediária, além de locais totalmente sincronizados que tiveram os maiores valores de amplitude.

Ao analisarem a vegetação de Caatinga entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, Oliveira *et al.* (2021) encontraram uma variação da amplitude de 0,120 e 0,290 no período seco e 0,290 a 0,600 no período chuvoso, Medeiros, Sousa e Figueiredo (2022) encontraram valores de desvio padrão de 0,007 no período seco e 0,120 no período chuvoso, para a vegetação no município de Patos-PB. O desvio padrão maior no período

chuvoso por indicar uma variedade maior de espécies que não podem ser identificadas no período seco devido a perda de folhas pela vegetação.

Tratando especificamente da análise de *clustering*, muitos estudos têm sido desenvolvidos nas áreas de FTSS, porém não estão diretamente relacionados ao comportamento da vegetação usando o IVDN e correlacionando com outros parâmetros biofísicos. Ao analisarem o impacto da variabilidade climática na fenologia foliar de uma floresta seca na Tailândia, Lamjiak *et al.* (2021), testaram alguns métodos de agrupamento, dentre eles o K-means, mas concluíram que o Mapa auto-organizável (SOM) foi o melhor para agrupar as áreas a partir de sua fenologia. Os autores utilizaram dados do microclima, de serapilheira e para os dados de fenologia monitoramento de campo, entre os anos de 2015 e 2018, assim, encontraram 5 grupos com distintos períodos fenológicos.

Usando a análise de *clustering* pelo método hierárquico, Frankilin *et al.*, (2018), identificaram a similaridade ecológica e geográfica em FTSS na Índia, Galan-de-Mera *et al.*, (2016) efetuaram uma análise fitossociológica em uma FTSS nos Andes Peruanos. Gurgel *et al.*, (2003) utilizaram os dados de IVDN para avaliar a variabilidade do índice e localizar espacialmente as grandes formações vegetais brasileiras, assim, os autores encontraram 9 *clusters*, dentre eles, o que abarcava a FTSS da Caatinga. Alguns estudos estarão voltados para a identificação de agrupamentos a partir de dados filogenéticos em florestas de montanha na China e em FTSS na Colômbia e no Brasil (LIMA, MEEROW e MANFRIM, 2020; CISNEROS *et al.*, 2021; WEN *et al.*, 2023;).

Liu, Yang e Ele (2021) efetuaram uma análise de *clustering* utilizando o K-means e o método hierárquico para identificar a similaridade hidrológica em 74 bacias hidrográficas no norte da China. Os autores encontraram 3 grupos, usaram dados de solo, geologia, declividade, precipitação e IVDN, apesar de utilizar dados e métodos semelhantes aos utilizados nessa pesquisa, o objetivo e o tipo de vegetação era outro.

4.6. Correlação entre a sazonalidade da vegetação e a precipitação

Para a correlação entre os valores do IVDN e os acumulados de precipitação, 3 *buffers* tiveram uma melhor correlação para 30 dias, 12 para 60 dias 21 para 90 dias e 5 para 120 dias, para os demais períodos de acumulados não houve melhores correlações.

Os três *buffers* com melhor correlação para 30 dias, apresentaram uma vegetação sem muita diversidade de espécies. Foi identificado nessas áreas: jurema-preta, marmeleiro e catingueira, essas três espécies apresentam um ganho de folhas logo após as primeiras chuvas, são caracterizadas por sinalizarem ambientes degradados ou em regeneração

(SABINO *et al.*, 2016; LUCENA *et al.*, 2017; ANDRADE, *et al.*, 2020; FREITAS *et al.*, 2020), por isso a correlação de 30 dias para essas áreas foi a melhor. Além disso, esses três *buffers* apresentam características semelhantes.

Os IDs 13 e 30 apresentam médias de chuva anual, médias de IVDN, altitudes, declividades e ITU muito homogêneos, já o ID19 apresentou uma singela diferença na média de IVDN e de precipitação que foram maiores e em sua declividade que foi mais baixa que as dos outros dois. As três áreas estão dentro de uma litologia de complexo metassedimentar. Outro ponto a ser destacado é com relação ao índice de precipitação padronizado, que não apresentou uma variação para essas três áreas, ou seja, concentraram a maioria dos anos como habituais ou moderadamente chuvoso, não apresentando outra classificação, o que indica uma menor variabilidade inter-anual da chuva para essas áreas. Nas análises de clusters, pelo menos dois desses *buffers* estavam sempre classificados dentro de um mesmo grupo, reafirmando a semelhança dessas áreas e do comportamento da vegetação delas.

Ao efetuarem a correlação entre o IVDN e a precipitação acumulada para a uma área de Caatinga preservada no município de Araripina - PE, entre os anos de 2016 e 2018, Santos *et al.* (2019) também encontraram melhores correlações para 30 dias ($R = 0,66$), os autores efetuaram as correlações a cada 5 dias e constataram que houve pouca variação nos valores de R após 15 dias de acumulado. Os autores sugeriram que esse pode ser um limiar de impacto das chuvas nos valores do índice de vegetação. Santos, Batista e Moura (2017) avaliaram a vegetação do município de Petrolina, os autores efetuaram a correlação também entre a precipitação e o IVDN para áreas degradadas e preservadas, entre os anos de 2013 e 2016 e ambas apresentaram uma correlação positiva para o acumulado de 30 dias, com um coeficiente de correlação de 0,66 para o período chuvoso e 0,63 para o período seco.

Para a correlação de 60 dias, 12 *buffers*, se destacaram, esses são característicos por baixas altitudes, com exceção do ID41 que apresentou uma altitude de 729m, declividades médias e baixas, algumas dessas áreas apresentaram pouca variação de espécies, mas a maioria eram áreas com maior densidade e maior quantidade de espécies, a exemplo dos IDs 15 e 29. Possivelmente a variação das espécies nessas áreas possa explicar esse prolongamento na resposta, espécies como a *Mimosa caesalpiniaefolia* (Sabiá), só responde após 60 dias após o início do período chuvoso (PEREIRA *et al.*, 1989).

Fatores como a densidade de madeira também podem influenciar na fenologia das plantas, espécies decíduas de baixa densidade de madeira perdem as folhas no início da

estação seca, enquanto que as decíduas de alta densidade de madeira, perdem as folhas no final da estação seca e as espécies perenes de alta densidade lenhosa são mais tolerante aos períodos secos, devido a sua capacidade de armazenamento de água nas raízes, ou por apresentarem raízes profundas que buscam água em zonas mais remotas (PALOSCHI *et al.*, 2021; WRIGHT *et al.*, 2021). Assim, áreas com maior densidade de madeira, podem também apresentar uma resposta mais tardia à precipitação, enquanto as espécies com menor densidade, por ter um baixo teor de armazenamento responde de forma mais instantânea.

A maioria das áreas apresentaram melhor correlação para 90 dias, as maiores altitudes obtiveram essa correlação, com exceção dos IDs 33 e 41, que apresentaram melhor correlação para 120 e 60 dias, respectivamente. Além da altitude, 7 dos 10 maiores valores de IVDN também apresentaram maiores correlações para 90 dias. Para 120 dias, apenas 5 *buffers* obtiveram uma melhor resposta, nesses houve a predominância de baixas altitudes e declividades. Souza e Hooke (2021) analisando a vegetação de Caatinga, com um grau elevado de preservação, encontraram melhores correlações para 90, 120 e 180 dias, mas foi a de 120 que se configurou como melhor parâmetro para explicar a relação com o IVDN, os autores explicam também que precipitação o acumulado de 365 dias também pode afetar a resposta do índice, bem como, relação do demais acumulados com os valores do índice de vegetação.

A maioria dos estudos que correlacionam a precipitação com o IVDN utilizam o acumulado médio anual ou durante determinados períodos, além de analisarem áreas de maiores escalas geográficas, como bacias, municípios, estados, o que inclui áreas com outras classes de uso e cobertura da terra, frisa-se mais uma vez que o objetivo desta pesquisa foi analisar apenas os dados de vegetação nativa, por isso optou-se por tomar como bases as áreas definidas pelo Mapbiomas. Bai, Fan e Yue (2023), efetuaram uma correlação para avaliar como a relação entre o IVDN e a precipitação variou em dimensões espaciais em áreas semiáridas e semiúmidas na China. Os autores encontraram uma correlação de 0,61 para áreas semiáridas e 0,59 para as áreas semiúmidas, enfatizando a relação sazonal existente entre as FTSS e a precipitação. Correlações positivas entre a vegetação e a precipitação, acima de 0,6 foram encontradas também em áreas de FTSS na Argentina (BURRY *et al.*, 2018) e no Brasil, mais precisamente no estado da Paraíba (SOUZA *et al.*, 2023). Gebu *et al.* (2020) encontraram uma correlação de 0,68 entre o SPI e o IVDN em uma área de floresta seca na Etiópia. Zou *et al.* (2020) utilizaram uma escala temporal entre 200 e 2017 em uma FTSS na Costa Rica para avaliar a resposta da

vegetação a seca meteorológica, os autores encontraram valores de 0,78 no período chuvoso e 0,66 no período seco.

Entender a vegetação das FTSS é uma tarefa de suma importância, mas também muito complexa, devido a todos os fatores que podem influenciar no seu comportamento. Os dados fenológicos e fitossociológicos aliados aos dados de precipitação e aos dados geológico-geomorfológicos podem ajudar na compreensão dessas áreas. Uma das dificuldades encontradas nessa pesquisa para entender a correlação das áreas em análise é a carência de detalhamento nos dados fenológicos, pois a maioria dos estudos (ANDRADE *et al.*, 2020; PALOSCHI *et al.*, 2021; MELO e CARNEIRO 2021; CRUZ *et al.*, 2022; NOGUEIRA *et al.*, 2022; ZANELLA *et al.*, 2022) se detém a análises mais genéricas que observam a variação da fenologia durante períodos sem especificar e detalhar quanto tempo após as chuvas as espécies perdem ou ganham folhas. Estudos futuros precisam monitorar as áreas preservadas, degradadas e em regeneração aliando aos dados dos índices de vegetação, de precipitação e das demais variáveis biofísicas para melhor compreensão do comportamento das áreas de FTSS.

O entendimento da produção de serapilheira também é importante para análise da fenologia e do comportamento de uma FTSS, pois indica os picos de perda de folhas, a quantidade de serapilheira produzidas nas diferentes épocas são uma resposta a variação sazonal da vegetação. A ocorrência de maior produção ocorre após o período chuvoso e em todo o período seco, diminuindo no final do período seco, devido a menor quantidade de folhas existentes na vegetação. Além de ser importante para o entendimento da sazonalidade, a produção de serapilheira é de grande importância para proteção do solo (ARAÚJO *et al.*, 2020; LEANDRO *et al.*, 2023).

4.7. Regressão Linear

O comportamento da vegetação de Caatinga, enquanto FTSS, pode ser observado a partir da regressão linear, combinando os dados de IVDN e precipitação acumulada, que vem sendo estudada há tempo como parâmetro que interfere e que se configura como indispensável para o entendimento dessa vegetação. Buscou-se, antes de mais nada, compreender quais variáveis podem interferir nesse comportamento e no controle da sazonalidade das FTSS, além da precipitação. Assim, identificou-se que a litologia, altitude e a declividade também são variáveis importantes.

Foram identificadas as semelhanças entre as áreas, a partir da análise de *clustering* e em seguida geradas as regressões. Todos os grupos que apresentaram melhores coeficientes de determinação (R^2) apresentaram valores de IVDN (médias), altos e médios,

esses agrupamentos também se caracterizaram por terem precipitações médias e altas e por apresentarem melhores correlações para 90 dias, mas as variáveis geológico-geomorfológicas e o grau de conservação variaram entre as *clusterizações*, o que dificulta a interpretação desse controle da sazonalidade. Foi possível prever o IVDN, usando os acumulados de precipitação, a partir dos agrupamentos, porém, pesquisas futuras devem aliar aos dados por sensores, análises fitossociológicas e fenológicas, para que haja uma compreensão maior do comportamento dessas áreas, bem como testar outros modelos de regressão, a fim de buscar melhores ajustes e melhores valores de R^2 .

Ao efetuarem uma regressão entre o IVDN e a precipitação em áreas de Caatinga nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, Oliveira *et al* (2021) identificaram valores de R^2 de 0,80 para uma área preservada, 0,50 em uma área degradada e 0,67, para áreas em regeneração. Os autores não levaram em consideração outras variáveis. Santos *et al.* (2020), efetuaram a regressão entre os dados de IVDN e temperatura da superfície, para áreas de Caatinga preservada e em sucessão ecológica no estado do Pernambuco, mas não usaram dados de precipitação.

Também envolvendo a relação entre a chuva e os dados de vegetação, outros estudos têm sido desenvolvidos em áreas de FTSS em diversos ambientes semiáridos do mundo e do Brasil (SANTOS, BATISTA e MOURA; 2017; BURRY *et al.*, 2018; SILVA *et al.*; 2019; GEBRU *et al.*, 2020). Mas, poucos desses estudos envolvem a relação entre os acumulados de chuva e o IVDN, por meio da regressão linear (PASSEL *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021; SOUZA e HOOKE, 2021). E não foram encontradas pesquisas que gerassem regressões lineares por meio da análise de *clustering*, a partir de variáveis geológico-geomorfológicas e de precipitação para explicar o comportamento das FTSS.

Outros trabalhos foram desenvolvidos gerando regressões a partir de dados de vegetação para diversas finalidades, mas não estão diretamente ligados a relação entre a precipitação e o comportamento da vegetação. Passel *et al.* (2020) efetuaram uma regressão linear usando os valores de IVDN para quantificar a cobertura lenhosa na Etiópia e na Tanzânia. Os melhores resultados para a Etiópia foram no período chuvoso ($R^2 = 0,95$), para a Tanzânia, os melhores valores foram na estação seca e pré-estação chuvosa ($R^2 = 0,69$). Mabunda *et al.* (2021) encontraram valores de R^2 acima de 0,70, ao relacionarem o IVDN e a biomassa obtida a partir de dados do campo, numa área semiárida em Moçambique, os autores também não usaram dados de precipitação. Jin *et al.* (2022) efetuaram na China uma análise de *clustering* e uma regressão, utilizando variáveis de precipitação, altitude e IVDN, mas o objetivo não foi observar o comportamento da

vegetação, eles buscavam analisar a influência dessas variáveis no material particulado fino.

Analisando áreas na Caatinga e no Cerrado, Rezende, Maillard e Freitas (2023), observaram a relação entre os dados de IVDN e a umidade do solo, a partir do produto SMOS, fornecido pela *Barcelona Expert Center (BEC)*, eles encontraram valores de R^2 entre 0,50 e 0,70, os autores destacaram a limitação dos produtos por sensores que medem umidade do solo, se deterem apenas a área superficial do solo, porém é preciso frisar a importância da umidade das camadas mais interiores do solo para o entendimento do comportamento da vegetação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS



*“Toda conclusão humana é apenas
uma tese esperando uma antítese”.*

Rodrigo Quito

Analisar a vegetação das FTSS é uma tarefa complexa, pois além de ter uma relação muito forte com a sazonalidade climática, outros fatores influenciam em seu comportamento e devem ser levados em consideração ao desenvolver estudos para esses ambientes. O contexto geológico-geomorfológico e o grau de conservação dessas áreas são exemplos de fatores que exercem tal influência.

Nas áreas analisadas estavam arranjos vegetacionais conservados e degradados, mas aquelas com maior porcentagem de vegetação dentro do *buffer* não condizem com áreas conservadas, fato que mostra que os arranjos vegetacionais preservados estão diminuindo de forma gradativa e sendo suprimidos por outros usos. Os *buffers* com maior grau de conservação, em sua maioria, estão classificados como complexo granitoide e foram aqueles que apresentaram as maiores médias de IVDN, embora o ID15 chamou atenção por ter uma média baixa, mas apresentar uma diversidade de espécie, ou seja, apesar de grande parte do *buffer* está degradado, um fragmento de vegetação resiste, esse fragmento estava próximo a uma área de serra. As áreas mais degradadas apresentaram as menores médias de IVDN, foram áreas predominantemente com altitudes e declividades médias e baixas, maioria de litologia metassedimentar e areia/arenito. Esses *buffers* apesar de não apresentarem uma vegetação conservada são áreas com umidades elevadas e que conservam o vigor da vegetação e suas folhas por mais tempo, mesmo no período seco, isso é corroborado pelos valores de ITU, que são mais elevados para essas áreas.

É notório que a vegetação de Caatinga é muito diversa em suas características, fato que fez com que diversos autores a classificasse como Caatingas, termo que expressa essa variedade de arranjos que podem ser encontrados nesse ambiente. A análise de *clustering* permitiu identificar áreas com comportamentos próximos e distintos, a partir das diversas variáveis utilizadas. As quatro *clusterizações* expressaram o comportamento da vegetação em cenários diferentes, os agrupamentos feitos com as variáveis separadamente, apresentaram uma maior homogeneidade entre as áreas, já o agrupamento que levou em consideração todas as variáveis juntas mostrou uma variação maior, especialmente com relação as altitudes, declividades e litologias.

A relação entre a precipitação e a vegetação mais uma vez se mostrou indissociável e foi a variável que mais mostrou influência no comportamento da Caatinga. A maioria das áreas degradadas e de menor diversidade de espécies apresentaram uma resposta mais rápida a precipitação acumulada antes do imageamento, enquanto as áreas com maior diversidade e com as maiores médias de IVDN tiveram uma resposta mais alongada. Vale salientar que, são necessários estudos mais aprofundados que possam aliar os dados

fenológicos e fitossociológicos aos dados estimados por sensores, para que haja um melhor entendimento do comportamento sazonal das FTSS.

As regressões foram maiores nos agrupamentos em que foram usados os dados de vegetação, geológico-geomorfológico e de precipitação de forma separada, os coeficientes de determinação da *clusterização* que envolvia todas as variáveis, foram menores. As regressões mostraram que é possível prever o comportamento sazonal da vegetação de Caatinga, porém necessárias pesquisas futuras que aprimorem os modelos de regressão e testem outros modelos de aprendizagem de máquina, como Random Forest, buscando melhorar as previsões para as FTSS em cenários geológico-geomorfológicos distintos, pois constatou-se que essas variáveis são importantes e influenciam no comportamento da vegetação, mas estatisticamente elas diminuem a precisão dos modelos de regressão.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. **O domínio morfoclimático semi-árido das Caatingas brasileiras**, Geomorfologia 43, 1–39, 1974.
- ABDULNASSAR, A. A.; NAIR, Latha R. A Comprehensive Study on the Importance of the Elbow and the Silhouette Metrics in Cluster Count Prediction for Partition Cluster Models. **Revista geintec-gestão Inovacao e Tecnologias**, v. 11, n. 4, p. 3792-3806, 2021.
- ADENIYI, M.O. Variability of daily precipitation over Nigeria. **Meteorol Atmos Phys**, v. **126**, p.161–176, 2014.
- AKINWUMIJU, A.S; OLORUNFEMI, M.O. Influence of geochemistry and topography on vegetation in tropical Nigeria: Geochemistry and soil thickness surpass topographic position. **Catena**. V.1; n.231. 2023.
- ALCÁNTARA AYALA, Irasema. Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida. **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, v. 17, n. 1, 2000.
- ALLEN, K.; DUPUY, J. M.; GEI, M. G.; HULSHOF, C.; MEDVIGY, D.; PIZANO, C.; POWERS, J.S. Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, p. 023001, 2017.
- ALLEN, R. G. *et al.* SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). **Advance Training and Users Manual–Idaho Implementation, version**, v. 1, p. 97, 2002.
- ALMEIDA, D. N. O.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVA, C. B.; BEZERRA, U. A.; FARIAS, M. DE O.; CANDEIAS, A. L. B. Análise das Bacias Hidrográficas do Rio Brígida, Rio Terra Nova e Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores 9 (GI9) de Pernambuco usando Índices de Vegetação e de Umidade. **Anais do Congresso Brasileiro de Cartografia**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 711-715. 2017.
- ANDRADE, A.P.; SILVA, D.S.; ALCANTARA, B.L.; R., SILVA, D. L.S.; MELO JUNIOR, J.L.A; MAGALHAES, A. L.R. MEDEIROS, A.N. Temporal rainfall variability as inductor of the phenology of Brazilian semiarid species. **Australian Journal of Crop Science**, v.14, n.2, p. 299-307. 2020.
- Andrade, E.M.; Guerreiro, M.J.S.; Palácio, H.A.Q; Campos, D.A. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, 2020.
- ANDRADE, Francisca Adriana Ferreira de; AMORIM, Laerte Bezerra de. **Deposição, estoque e decomposição de serapilheira em ecótono caatinga- cerrado em Oeiras, PI**. Revista Somma. Teresina, v.4, n.2, 2018, p.102-114,
- ANDRADE-LIMA, D. The caatingas dominium. **Revista. Brasil**, v. 4, n. 1, 1981.
- ANTONELLI, A.; SANMARTÍN, I. **Why are there so many plant species in the Neotropics?** *Taxon*, 2011.
- ANTONIO GUZMÁN, J. Q.; SANCHEZ-AZOFEIFA, Arturo; ESPÍRITO-SANTO, Mário M. MODIS and PROBA-V NDVI Products Differ when Compared with Observations from Phenological Towers at Four Tropical Dry Forests in the Americas. **Remote Sensing**, v.11, p.2-18. 2019.

ARAÚJO, Elânia Daniele Silva. **Classificação por unidade de paisagem e estudo da variação da biomassa da vegetação em um complexo de Serras no interior da Paraíba utilizando Sensoriamento Remoto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p.146. 2018.

ARAÚJO, F.S.; OLIVEIRA, R.F. & LIMA-VERDE, L.W.. **Composição, espectro biológico e síndromes de dispersão na vegetação de um inselbergue no domínio da Caatinga**. 2008.

ARAÚJO, H. F.; CANASSA, N. F.; MACHADO, C. C.; TABARELLI, M. Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 18440, 2023.

ARAÚJO, Isa Gabriela Delgado de; DINIZ, Marco Tulio Mendonça; DANTAS, Flávia Luana; SILVA, Fernando Eduardo Borges da. **Climatologia do Sertão da Paraíba, Brasil**. 2017, 1: 2439-2448. In: PEREZ FILHO, Archimedes; AMORIM, Raul Reis (Org). *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*. UNICAMP, 2017

ARAÚJO, V. F. P. *et al.* Spatial-temporal variation in litterfall in seasonally dry tropical forests in northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 80, n. 2, 2020.

AVIAD, Y.; KUTIEL, H.; LAVEE, H. Variation of dry days since last rain (DDSLR) as a measure of dryness along a Mediterranean—arid transect. **Journal of Arid Environments**, v. 73, n.6-7, p.658–665, 2009.

AZEVEDO, Pedro Vieira de; ALVES, Telma Lucia Bezerra. Análise da variação espacial e temporal do índice de vegetação e sua relação com parâmetros climáticos na bacia hidrográfica do alto curso do rio Paraíba, estado da Paraíba, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 530-553, 2015.

BAI, X.; FAN, Z.; YUE, T. Dynamic pattern-effect relationships between precipitation and vegetation in the semi-arid and semi-humid area of China. **Catena**. V.1; n. 232, 2023.

BANDA, K. R. *et al.* Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. **Science**, v. 353, n. 6306, 2016.

BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. L.; PAREDES, F.; ELLIOTT, S.; AYUGA, J. G. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI normalized difference vegetation index (2008–2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, p. 235-252, 2019.

BATISTA, W. C. A. *et al.* FLORISTIC COMPOSITION AND SIMILARITY OF A CAATINGA FOREST AREA, BAHIA, BRAZIL. **HOLOS**, v. 6, 2020.

BECERRA, J. A. B.; CARVALHO, S.; OMETTO, J. P. H. B. **Relação das sazonalidades da precipitação e da vegetação no bioma caatinga: abordagem multitemporal**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR. João Pessoa-PB: [s.n.]. 2015. p. 6668-6674.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrologic Science Bulletin**, v.24, n.1, p.43–69. 1979.

BEZAURY-CREEL, J. E. El valor de los bienes y servicios que las áreas naturales protegidas proveen a los mexicanos. **The Nature Conservancy Program México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.**, 2009.

BIRHANU, L.; BEKELE, T.; TESFAW, B.; DEMISSEW, S. Relationships between topographic factors, soil and plant communities in a Dry Afromontane Forest patch of Northwestern Ethiopia. **Plos One**, v. 16, n. 3, p. e0247966, 2021.

BLAIN, Gabriel Constantino, ROLIM, Glauco de Souza; BRUNINI, Orivaldo. **DIMES—Software para cálculo e interpretação do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) em visual basic for application em ambiente MS-Excel. V Congresso Brasileiro de Agroinformática-SBI-AGRO. Londrina. 2005.**

BOKE-OLÉN, N. *et al.* Remotely sensed soil moisture to estimate savannah NDVI. **Plos One**, v. 13, n. 7, 2018.

BOYD, D. S.; FOODY, G. M.; RIPPLE, W. J. Evaluation of approaches for forest cover estimation in the Pacific Northwest, USA, using remote sensing. **Applied Geography**, v. 22, n. 4, 2002.

BRITO, Pedro Vinícius da Silva; DOS SANTOS, Tayran Oliveira; MORAIS, Ygor Cristiano Brito. Análise da sazonalidade da vegetação de caatinga do município de Petrolina (Pernambuco) a partir de imagens do satélite Landsat 8—OLI. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 1, 2020.

BURRY, L. Susana; PALACIO, Patricia I.; SOMOZA, Mariano; MANDRI, Matilde E.Trivi de; LINDSKOUG, Henrik B.; MARCONETTO, M. Bernarda; D'ANTONI, Héctor L. Dynamics of fire, precipitation, vegetation and NDVI in dry forest environments in NW Argentina. Contributions to environmental archaeology. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v.18, p.747-757. 2018

CAETANO, R.; SILVA, T. B.; BENFICA, N. N.; CASTRO, D. R. Uso de índices espectrais na caracterização da cobertura vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.8, n. 2, 28-43. 2022

CARDOSO, D.B.O.S.; QUEIROZ, L.P. Diversidade de Leguminosae nas caatingas de Tucano, BA: Implicações para a fitogeografia do semi-árido do Nordeste do Brasil. **Rodriguésia**, v. 58, p.379-371.2007

CARLSON, T.N; RIPLEY, D.A Sobre a relação entre NDVI, cobertura vegetal fracionada e índice de área foliar. **Remote Sens. Environment**, v. 62, p.241–252.1997.

CASTELLETTI, C.H.M.; SILVA, J.M.C.; TABARELLI, M.; SANTOS, A.M.M. **Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar.** In: SILVA J.M.C; TABARELLI, M.; FONSECA, M.T. (Orgs.). Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2004.

CASTILLO, J.L.U; RAMOS LEAL, J.A; CRUZ, D.A.M.; CERVANTES MARTÍNEZ, A.; MARÍN CELESTINO, A.E. Identificação dos Fatores Dominantes no Processo de Recarga de Água Subterrânea, Utilizando Abordagens Estatísticas Multivariadas em uma Região Semiárida. **Sustentabilidade**, v. 13, 11543. 2021

CAVALCANTI, L. C. de S. **Da descrição de áreas à teoria dos geossistemas: uma abordagem epistemológica sobre sínteses naturalistas.** 2013. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 218p. 2013.

CHADWICK, R. *et al.* Large rainfall changes consistently projected over substantial areas of tropical land. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 2, 2016.

- CHEN, S.; LIU, X.; MA, J.; ZHAO, S.; HOU, X. (2019). DBSCAN parameter selection algorithm based on K-means two classification algorithm. **The Journal of Engineering**, v. 2019, n. 23, p. 8676-8679, 2019.
- CHEN, Z.; WANG, W.; FU, J. Vegetation response to precipitation anomalies under different climatic and biogeographical conditions in China. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020.
- CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical Geography: a system approach**. Londres: Prentice Hall Inc. Co., 1971.
- CHRISTOPHERSON, R. W. **Geossistemas. Uma introdução à geografia física**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- CISNEROS, C. M. G.; HERINGER, G.; DOMEN, Y. S. M.; SÁNCHEZ, L. R.; MEIRANETO, J. A. A. The environmental filtering and the conservation of tropical dry forests in mountains in a global change scenario. *Biodiversity and Conservation*, v. 30, n. 10, p. 2689-2705, 2021.
- CLUBB, Fiona J.; BOOKHAGEN, Bodo; RHEINWALT, Aljoscha. Clustering river profiles to classify geomorphic domains. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 124, n. 6, p. 1417-1439, 2019.
- CORRÊA, A. C. B.; SOUZA, J.O.P; CAVALCANTI, L.C.S. **Solos do ambiente semiárido brasileiro: erosão e degradação a partir de uma perspectiva geomorfológica**. GUERRA, AJT; JORGE, MCO Degradação dos solos no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 127-169, 2014.
- CORRÊA, A. C. D. B. *et al.* The semi-arid domain of the Northeast of Brazil. In: *The Physical Geography of Brazil*. Springer, Cham, p. p. 119-150, 2019.
- COSTA, G. M. *et al.* Variações locais na riqueza florística em duas ecorregiões de caatinga. **Rodriguesia**, v. 66, n. 3, 2015.
- CRUZ, F. R. D. S., SILVA, R. D. S., ALVES, E. U., & RODRIGUES, C. M. Fenologia de *Sideroxylon obtusifolium* (Roem. & Schult.) TD Penn. em área de Caatinga, Boa Vista-PB. *Ciência Florestal*, v. 32, p. 653-672, 2022.
- CUBA, N; ROGAN, J; CHRISTMAN, Z; WILLIAMS, C; SCHNEIDER, L; LAWRENCE, D.E.; MILLONES, M. Modeling dry season deciduousness in the Mexican Yucatán Forest using MODIS EVI data (2000–2011). **Remote Sensing**, v.50, p.26–49. 2013.
- CUNHA, J.; NOBREGA, R.L.; RUFINO, I.; ERASMI, S.; GALVÃO, C.; VALENTE, F. 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.
- DRORI, R.; DAN, H.; SPRINTSIN, M.; SHEFFER, E. Precipitation-sensitive dynamic threshold: A new and simple method to detect and monitor forest and woody vegetation cover in sub-humid to arid areas. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, p.1231, 2020.
- EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento**. Campinas, 2018. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento> > Acesso em: 29 mar. 2022

- ESPÍRITO-SANTO, M. M. *et al.* Bases para a conservação e uso sustentável das florestas estacionais decíduas brasileiras: a necessidade de estudos multidisciplinares. **UNIMONTES Científica**, v. 8, n. 1, 2006.
- FEITOSA, FERNANDO AC; VIDAL, Cláudio. Estudos hidrogeológicos de bacias sedimentares da região semiárida do nordeste brasileiro. Proposta de trabalho. **Serviço Geológico do Brasil**. 2004.
- FENG, S.; FU, Q. Atmospheric Chemistry and Physics Expansion of global drylands under a warming climate. **Atmos. Chem. Phys**, v. 13, 2013.
- FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. DE. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, 2018.
- FIELD, A. **Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics**. 4ed. Sage Publications. 2013.
- FRANKLIN, J.; ANDRADE, R.; DANIELS, M. L.; FAIRBAIRN, P.; FANDINO, M. C.; GILLESPIE, T. W.; VENNETIER, M. Geographical ecology of dry forest tree communities in the West Indies. *Journal of Biogeography*, v. 45, n. 5, p. 1168-1181, 2018.
- FREITAS, F.D.A; HOLANDA, A.C; MARACAJÁ, P.B; ANDRADE, A.B.A; SANTOS, J.L.G; OLIVEIRA, F.S. Estrutura fitossociológica de vegetação arbóreo-arbustiva em área de caatinga com histórico de perturbação antrópica na Paraíba, Brasil. **Acta Biológica Catarinense**, v. 1, pág. 92-102, 2020.
- FRIES, A.; SILVA, K.; PUCHA-COFREP, F.; OÑATE-VALDIVIESO, F.; OCHOA-CUEVA, P. WATER balance and soil moisture deficit of different vegetation units under semiarid conditions in the andes of southern Ecuador. *Climate*, v.8, n.2, p.30. 2020.
- GALAN-DE-MERA, A.; SANCHEZ-VEGA, I.; LINARES-PEREA, E.; CAMPOS, J.; MONTOYA, J.; VICENTE-ORELLANA, J.A. A phytosociological analysis and synopsis of the dry forests and succulent vegetation of the Peruvian Andes. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, v. 689-703, 2016.
- GAUR, M. K.; SQUIRES, V. R. **Geographic extent and characteristics of the world's arid zones and their peoples**. In: *Climate variability impacts on land use and livelihoods in drylands*. Springer, Cham, p. p. 3-20, 2018.
- GEBRU, Belay; LEE, Woo Kyun; KHAMZINA, Ásia; WANG, Sonam; CHA, Sungeun; CHOLHO, Canção; LAMCHIN, Munkhnasan. Spatiotemporal analysis of multiple desertification indices in Afromontane dry forests of northern Ethiopia. **Environ Dev Sustain**, v. 23, p. 423–450, 2021.
- Gerard, F.F.; George, C.T.; Hayman, G.; Chavana-Bryant, C.; Weedon, G.P. Leaf phenology amplitude derived from MODIS NDVI and EVI: Maps of leaf phenology synchrony for Meso- and South America. **Geoscience Data Journal**, v. 7, n. 1, 2020.
- GURGEL, Helen da C.; FERREIRA, Nelson J.; LUIZ, Alfredo JB. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 7, p. 85-90, 2003.
- HAIR, J. F. Jr.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis**. Pearson. 2014.

- HARDY, Andrew J. Mapping soil moisture as an indicator of transport corridor slope instability using remotely sensed data. **Journal of Maps**, v. 6, n. sup1, p. 1-11, 2010.
- HOLANDA, A. E. R.; SOUZA, B. C.; CARVALHO, E. C. D.; OLIVEIRA, R. S.; MARTINS, F. R.; MUNIZ, C. R.; SOARES, A. A. (2019). How do leaf wetting events affect gas exchange and leaf lifespan of plants from seasonally dry tropical vegetation? **Plant Biology**, v. 21, n. 6, p. 1097-1109, 2019.
- HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, V 4, nº 4., p. 367-376, 1998.
- INEKWE, John; MAHARAJ, Elizabeth Ann; BHATTACHARYA, Mita. Drivers de emissões de dióxido de carbono: uma investigação empírica usando métodos de agrupamento hierárquicos e não hierárquicos. **Estatísticas ambientais e ecológicas**, v. 27, p. 1-40, 2020.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. INPE Nordeste, 2015.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. INPE Nordeste, 2022.
- JARAMILLO, V. J. *et al.* Biomass, Carbon, and Nitrogen Pools in Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. **Ecosystems**, v. 6, n. 7, 2003.
- JEMAI, S.; KALLEL, A.; AGOUBI, B. Spatial and temporal variability of precipitation and its controlling factors under arid climatic conditions: case of the Gabes river basin, southern Tunisia. **Environ Dev Sustain**. V.24, p.5496–5513. 2022.
- JESUS, JB; KUPLICH, TM; DE CARVALHO BARRETO, Í. D.; DA ROSA, CN; HILLEBRAND, FL. Temporal and phenological profiles of open and dense Caatinga using remote sensing: response to precipitation and its irregularities. **Revista de Pesquisa Florestal**, v. 32, p. 1067-1076, 2021.
- JIN, H.; CHEN, X.; ZHONG, R.; LIU, M. Influence and prediction of PM2. 5 through multiple environmental variables in China. **Science of The Total Environment**, v. 849, p. 157910, 2022.
- JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A. Optimizing and comparing gap-filling techniques using simulated NDVI time series from remotely sensed global data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 76, p. 93-111, 2019.
- Kasai, M., Brierley, G. J., Page, M. J., Marutani, T., & Trustrum, N. A. Impacts of land use change on patterns of sediment flux in Weraamaia catchment, New Zealand. *Catena*, v. 64, n.1, 27-60, 2005.
- LAMJIAK, T.; KAEWTHONGRACH, R.; SIRINAOVAKUL, B.; HANPATTANAKIT, P.; CHITHAISONG, A.; POLVICHIA, I. Characterizing and forecasting the responses of tropical forest leaf phenology to El Niño by machine learning algorithms. *Plos one*, v. 16, n. 8, p. e0255962, 2021.
- LEAL, Inara Roberta; DA SILVA, José Maria Cardoso. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Editora Universitária UFPE, 2004.
- LEONARDO, F. D. A. P.; NETO, P. H. M.; SOUTO, J. S.; PEREIRA FILHO, J. V.; SOUTO, P. C.; AVES, A. U. (2023). Ciclagem de nutrientes e macrofauna do solo em áreas de caatinga. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 9, p. 16733-16752, 2023.

- LI, J.; ZHENG, A.; GUO, W.; BANDYOPADHYAY, N.; ZHANG, Y.; WANG, Q. Avaliação de risco de inundação urbana baseada no algoritmo de agrupamento DBSCAN e K-means. **Geomática, Perigos e Riscos Naturais**, v. 14, n. 1, pág. 2250527, 2023.
- LIMA, F. S. DE; ALMEIDA, N. V. Dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental (APA) do Cariri, Paraíba-PB, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, 2017.
- LIMA, N. E. D.; CARVALHO, A. A.; LIMA-RIBEIRO, M. S.; MANFRIN, M. H. Caracterização e história biogeográfica dos ecossistemas secos neotropicais. **Rodriguésia**, v. 69, p. 2209-2222, 2018.
- LIMA, Natácia Evangelista; MEEROW, Alan William; MANFRIN, Maura Helena. Genetic structure of two *Acrocomia* ecotypes (Arecaceae) across Brazilian savannas and seasonally dry forests. *Tree Genetics & Genomes*, v. 16, n. 4, p. 56, 2020.
- LIMA, R. P.; FERNANDES, M. M.; FERNANDES, M. R. D. M.; MATRICARDI, E. A. T. Aporte e decomposição da serapilheira na Caatinga no Sul do Piauí. **Floresta e Ambiente**, vol.22, p.42-49. 2015.
- LIMWATTANAPIBOOL, Onapa; ARCH-INT, Somjit. Determination of the appropriate parameters for K-means clustering using selection of region clusters based on density DBSCAN (SRCD-DBSCAN). **Expert Systems**, v. 34, n. 3, p. e12204, 2017.
- LINARES-PALOMINO, R.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; PENNINGTON, R. T. Neotropical Seasonally Dry Forests: Diversity, Endemism, and Biogeography of Woody Plants. In: **Seasonally Dry Tropical Forests**. [s.l.: s.n.].
- LIU, Changhong *et al.* Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-14, 2021.
- LIU, W. T.; MASSAMBANI, O.; NOBRE, C. A. Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. **International Journal of climatology**, v. 14, n. 3, p. 343-354, 1994.
- LOIOLA, Maria Iracema Bezerra; ROQUE, Alan de Araújo; OLIVEIRA, Ana Claudia Pereira de. **Caatinga: Vegetação do semiárido brasileiro**. **Revista Ecologia**, 2012.p.14-19.
- LOURENÇO, R., Lopes, J. W. B., de LA Ramos, N. N., de Tillesse, F. E. A., Costa, C. A. G., & de Araújo, J. C. Análise temporal do NDVI sob condições de caatinga preservada. In **INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING**, Vol. 3, p. 808-814. 2015.
- LUCENA, M. S.; ALVES, A. R; BAKKE, I. A. Regeneração natural da vegetação arbóreo-arbustiva de caatinga em face de duas formas de uso. **Agropecuária Científica no Semiárido**. v 13(3): 212-222. 2017
- MABUNDA, I. R. D. S.; GUASSELLI, L. A.; NHONGO, E. J. S.; Bandeira, B. Estimativa da biomassa florestal para fins energéticos utilizando índices de vegetação e dados de campo, Distrito de Mabalane–Moçambique. **Revista brasileira de cartografia, Rio de Janeiro**. v. 73, n. 1 p. 313-328, 2021.
- MALVEZZI, Roberto. **Semi-árido - uma visão holística**. Brasília, 2007. 140p.

- MARCHESINI, V.A; NOSETTO, M.D; HOUSPANOSSIAN, J.; JOBBÁGY, EG. Contrasting hydrological seasonality with latitude in the South American Chaco: The roles of climate and vegetation activity. **Journal of Hydrology**, v. 587, 2020.
- MARIANO, D. A.; DOS SANTOS, C. A.; WARDLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYER, A. V.; TADESSE, T.; SVOBODA, M. D. 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.
- MARTÍNEZ, E.; GALINDO-LEAL, C. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: clasificación, descripción y distribución. **Botanical Sciences**, n. 71, 2017.
- MASIERO, J.R; MAINZER, AK; BAUER, JM; GRAV, T.; NUGENT, CR; STEVENSON, R. Identificação de famílias de asteróides usando o método de agrupamento hierárquico e propriedades físicas WISE/NEOWISE. **The Astrophysical Journal**, v. 770, n. 1, pág. 7, 2013.
- MATALLO JUNIOR., H. **A desertificação no mundo e no Brasil**. In: SCHENKEL, C. S. E. M. J. H. Desertificação. Brasília: UNESCO, 2003.
- MATTOS, S. H. V. L.; PEREZ FILHO, A. **Complexidade e estabilidade em sistemas geomorfológicos: uma introdução ao tema**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 5 n.1, p. 11-18, 2004.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim. Proceedings... Anaheim: American Meteorological Society, 1993. p. 179 - 184.
- MEDEIROS, R. L. B.; SOUSA, G.M.; FIGUEIREDO, C. F. V.; FORMIGA, A. C.S.; OLIVEIRA, F. F. D.; OLIVEIRA, P. A. T.; LEITE, A. C. N. Resposta espectral do comportamento do NDVI e NDWI diante de diferentes intensidades pluviométricas na cidade de Patos–PB. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e49811326819-e49811326819, 2022.
- MEDEIROS, R.; ANDRADE, J.; RAMOS, D.; MOURA, M.; PÉREZ-MARIN, A.M; SANTOS, C.A; CUNHA, J. Fenologia do sensoriamento remoto da caatinga brasileira e seus determinantes ambientais. **Sensoriamento Remoto**, v. 14, n. 11, pág. 2637, 2022.
- MEDEIROS, SS; GALVÃO, CO **Recursos Hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande–PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia**, 2012.
- MELO, M. L. A.; CARNEIRO, M.C. Florística e fenologia de dez espécies do extrato arbustivo-arbóreo em torno do Apiário-Escola da Universidade Estadual de Alagoas (UNEAL). *Diversitas Journal*, v. 6, n. 1, p. 1748-1776, 2021.
- MÉNDEZ-TORIBIO, Moisés; MEAVE, Jorge A.; ZERMEÑO-HERNÁNDEZ, Isela; IBARRA-MANRÍQUEZ, Guillermo. Effects of slope aspect and topographic position on environmental variables, disturbance regime and tree community attributes in a seasonal tropical dry forest. *Journal of vegetation science*, V.27, n.6, 2016.
- MENEZES, Maiara Cruz; OLIVEIRA, João Henrique Moura; FREITAS, Daniel de Oliveira Souza. Análise do NDVI nos municípios de Canudos, Jeremoabo e Uauá (Setor

- Sul Do Polo Jeremoabo–Bahia) como subsídio à caracterização do uso do solo e cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 4, n. 2, 2023.
- MMA- Ministério do Meio Ambiente, 2010. **Monitoramento dos biomas brasileiros**
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, 2002. p. 1-10.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. **Gheyi, HR; PAZ, VPS**, 2012.
- MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: a case study from northeastern brazil. **Journal of Hydrology**, p. 55–68, 2012.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. John Wiley & Sons. 2012.
- MUÑOZ, R., ENRÍQUEZ, M., BONGERS, F., LÓPEZ-MENDOZA, R. D., MIGUEL-TALONIA, C., & MEAVE, J. A. Lithological substrates influence tropical dry forest structure, diversity, and composition, but not its dynamics. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 6, p. 1082207, 2023.
- MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. Ecology of tropical dry forest. **Annual review of ecology and systematics**. Vol. 17, 1986.
- NARVÁEZ-GÓMEZ, J. P.; CABRAL, A.; FRAZÃO, A.; COLLI-SILVA, M.; SANTANA, P. **Biogeografia neotropical: história e conceitos**. Botânica no Inverno. Organizadores Laboratório de Algas Marinhas, 145. 2018.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2.ed. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 1989.
- NOURANI, Vahid; KOMASI, Mehdi. A geomorphology-based ANFIS model for multi-station modeling of rainfall–runoff process. **Journal of Hydrology**, v. 490, p. 41-55, 2013.
- OLIVEIRA, C.C.; ZANDAVALLI, R.B.; LIMA, A.L.A.; RODAL, M.J.N. Functional groups of woody species in semi-arid regions at low latitudes. **Austral Ecology**, n.40, 40–49. 2015
- OLIVEIRA, Diogo Gallo de. PRATA, Ana Paula do Nascimento, FERREIRA, Robério Anastácio; JESUS, Janisson Batista de. Composição e similaridade florística de um fragmento de Caatinga em Sergipe, Brasil. n.38. Jataí, 2020. p.250-273
- OLIVEIRA, Paulo Jerônimo Lucena; SILVA FILHO, Carlos Roberto; COSTA, Diógenes Félix Silva. Utilização de índice espectral na distribuição espacial da Caatinga densa do município de Caicó, Rio Grande do Norte-Brasil. **GeoTextos**, 2021.
- OLIVERIA, V. G. D., SILVA, M. T., SANTOS, C. A. C. D., SERRÃO, E. A. D. O., SILVA, B. K. D. N., SANTOS, M. R. D. S.; CORRÊA, I. C. P. Variabilidade temporal da cobertura das terras nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 125-136, 2021.
- OLIVERIA, V. G. D.; SILVA, M. T.; SANTOS, C. A. C. D.; SERRÃO, E. A. D. O.; SILVA, B. K. D. N.; SANTOS, M. R. D. S.; CORRÊA, I. C. P. Variabilidade temporal da

cobertura das terras nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 125-136, 2021.

PALOSCHI, R.A.; RAMOS, D.M.; VENTURA, D.J.; SOUZA, R.; SOUZA, E.; MORELLATO, L.P.C.; BORMA, L.D.S. Environmental determinants of water use for caatinga woody plant species: combining remote sensing phenology and sap flow measurements. **Sensoriamento Remoto**, v. 13, n. 1, pág. 75, 2020.

PAPAIOANNOU, George; VASILIADES, Lampros; LOUKAS, A. Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. *Water resources management*, v. 29, p. 399-418, 2015.

PASSEL, V. J.; DE KEERSMAECKER, W.; SOMERS, B. Monitoring woody cover dynamics in tropical dry forest ecosystems using sentinel-2 satellite imagery. **Remote Sensing**, v. 12, n. 8, 2020.

PASTOR-GUZMANA, J.; DASHA, J.; ATKINSON, M. P. Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, p. 71-84, 2018.

PAZ, Wandklebson Silva; SOUZA, Jefferson Thiago. Fenologia de espécies vegetais arbóreas em um fragmento de caatinga em Santana do Ipanema, AL, Brasil. **Diversitas Journal**, v. 3, n. 1, p. 39-44, 2018.

PENNINGTON, R. T.; LAVIN, M.; OLIVEIRA-FILHO, A. Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: Perspectives from seasonally dry tropical forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 40, 2009.

PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. An overview of the plant diversity, biogeography and conservation of neotropical savannas and seasonally dry forests. **Neotropical savannas and seasonally dry forests**, 1-29. 2006

PEREIRA DE ANDRADE, Albericio *et al.* Temporal rainfall variability as inductor of the phenology of Brazilian semiarid species. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 2, p. 299-307, 2020.

PÉREZ-GARCÍA, E. A.; MEAVE, J. A.; CEVALLOS-FERRIZ, S. R. S. Flora and vegetation of the seasonally dry tropics in Mexico: origin and biogeographical implications. **Acta botánica mexicana**, n. 100, p. 149-193, 2012.

PHILIPP, M.; WEGMANN, M.; KÜBERT-FLOCK, C. Quantifying the Response of German Forests to Drought Events via Satellite Imagery. **Remote Sensing**, v. 13, n. 9, 2021.

PIMENTEL, Carlos. A relação da planta com a água. **Seropédica: Edur**, 2004.

POWER, M. J.; WHITNEY, B. S.; MAYLE, F. E.; NEVES, D. M.; DE BOER, E. J.; MACLEAN, K. S. Fire, climate and vegetation linkages in the bolivian chiquitano seasonally dry tropical forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 371, n. 1696, 2016.

PRADO, D. E. As caatingas da América do Sul. In: **Ecologia e Conservação da Caatinga**. [s.l: s.n.].

- PRADO, D. What is the Gran Chaco vegetation in South America? I: A review. Contribution to the study of flora and vegetaion of the Chaco. V. **Candollea**, v. 48, n. 1, 1993.
- QUEIROZ, L. P. DE. The Brazilian Caatinga: Phytogeographical Patterns Inferred from Distribution Data of the Leguminosae. In: **Neotropical Savannas and Seasonally Dry Forests**. [s.l: s.n.].
- RACOLTE, G., MARQUES, A., SCALCO, L., TONIETTO, L., ZANOTTA, D. C., CAZARIN, C. L.; VERONEZ, M. R. Spherical K-Means and Elbow Method Optimizations With Fisher Statistics for 3D Stochastic DFN From Virtual Outcrop Models. **IEEE Access**, v. 10, p. 63723-63735, 2022.
- RAMI, Oumaima; HASNAOUI, Moulay Driss; OUAZAR, Driss; BOUZIANE, Ahmed. Uma abordagem mista baseada em clusters para uma regionalização hidrológica territorial. **Árabe J Geosci**, v. 15, n. 75. 2022.
- RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. Biodiversity Patterns of the Woody Vegetation of the Brazilian Cerrado. In: **Neotropical Savannas and Seasonally Dry Forests**. [s.l: s.n.].
- RATTER, J.A., RIBEIRO, J.F., and Bridgewater, S. (1997), “**The Brazilian Cerrado and Threats to its Biodiversity**,” *Annals of Botany*, 80, 223–230.
- REICH, P. B.; BORCHERT, R. Water stress and tree phenology in a tropical dry forest in the lowlands of Costa Rica. **Journal of Ecology**, v. 72 n.1, p. 61-74, 1984.
- REZENDE, P. L.; MAILLARD, P.; FREITAS, J. A. **Variação Espaço-Temporal da Umidade do Solo e do NDVI de Coberturas vegetais do Cerrado e da Caatinga**. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, INPE, 4p. 2023.
- RIBEIRO, G. A.; SILVA, J. N. D. C.; DA SILVA, J. B. Índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS): estado da arte e suas potencialidades (Adjusted Vegetation Index to Solo (SAVI): state of the art and its potential). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, 2016.
- RITO, K. F.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; QUEIROZ, R. T.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 3, p. 828-838, 2017.
- ROA LOBO, José; KAMP, Ulrich. Uso del índice topográfico de humedad (ith) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. **Revista geográfica venezolana**, v. 53, n. 1, 2012.
- ROA, José Gregorio; ULRICH, Kamp. Uso del índice topográfico de humedad (ith) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado trujillo-Venezuela. **Revista geográfica venezolana**, v. 53, p. 1, 2012.
- ROERINK, GJ; MENENTI, M.; SOEPBOER, W.; SU, Z. ASSESSMENT of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, n. 1–3, 2003.
- ROGERSON, Peter A. **Métodos estatísticos para geografia: um guia para o estudante**. 3 ed. Bookman Editora, 2012.

- ROUSE, J. W., R. H. HAAS, J. A. SCHELL, D. W. DEERING, J. C. HARLAN. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation.** NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 1973, 371p.
- RUFINO, M. K. G.; ANDRADE MOURA, G. K.; TROVÃO, D. M. D. B. M.; ASSIS PRADO, C. H. B.; SILVA, F. K. G. Leaf deciduousness and flowering of woody caatinga species. **Biotemas**, v. 33, n. 4, 2020.
- SÁ, I. B.; RICHE, G. R.; FOTIUS, G. A. **As paisagens e o processo de degradação do semi-árido nordestino.** In: Silva, J.M.C.; Tabarelli, M.; Fonseca, M.T. da.: Lins, L.V.(Org.). Biodiversidade brasileira: avaliação e identificação de áreas e ações prioritárias para conservação. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004, v., p. 17-36.
- SABINO, F. G. S.; CUNHA, M. C. L; SANTANA, G. M. Estrutura da vegetação em dois fragmentos de caatinga antropizada na Paraíba. **Floresta Ambiental.** 2016; 23(4): 487-497.
- SAMMOUDA, R.; EL-ZAART, A. Uma abordagem otimizada para segmentação de imagens de próstata usando algoritmo de agrupamento K-means com método de cotovelo. *Inteligência Computacional e Neurociências.* **Inteligência Computacional e Neurociência**, 2021.
- SANTOS, C. A. G., BRASIL NETO, R. M., DA SILVA, R. M., & COSTA, S. G. F. Cluster analysis applied to spatiotemporal variability of monthly precipitation over Paraíba state using Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 637, 2019.
- SANTOS, C. V. B.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J.; CARVALHO, H. D. S.; MIRANDA, R. D. Q.; MONTENEGRO, S. 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. 06, p. 2510-2522, 2021.
- SANTOS, C. V.; CARVALHO, H. F.; SILVA, M. J.; MOURA, M. S.; GALVÍNCIO, J. D. Uso de sensoriamento remoto na análise da temperatura da superfície em áreas de floresta tropical sazonalmente seca. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 941-953, 2020.
- SANTOS, Cícero Félix dos; SCHISTEK, Haroldo. OBERHOFER, Maria. Conhecendo o Semi-árido em Busca da Convivência. 2007. 48p.
- SANTOS, Cloves Vilas Boas dos; CARVALHO, Hérica Fernanda de Sousa; SILVA, Marcelo José da; MOURA, Magna Soelma Beserra de; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. 6p. Dinâmica vegetacional e hídrica em áreas de Caatinga por Sensoriamento Remoto. **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS “Semiárido e Sociedade: sustentabilidade para gerações futuras.** Ceará, 2019.
- SANTOS, Cravo V.B; BAPTISTA, G.M.M.; MOURA, M.S.B. Sazonalidade dos Índices de Vegetação em diferentes usos do solo no Vale do São Francisco. **Journal of Hiperespectral Remote Sensing**, v.7, p.158-167, 2017.
- SANTOS, Francineide Amorim. ALVES, T. L., AZEVEDO, P. V., & SANTOS, C. Comportamento sazonal do albedo e dos índices de vegetação na bacia hidrográfica do alto curso do rio Paraíba (Albedo Seasonal Behavior and vegetation indices in the upper

basin Paraíba River). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 1015-1023, 2015.

SCITOVSKI, Rudolf; SABO, Kristian. A combination of k-means and DBSCAN algorithm for solving the multiple generalized circle detection problem. **Advances in Data Analysis and Classification**, v. 15, n. 1, p. 83-98, 2021.

SENA, Jaricélia Patrícia de Oliveira. **Análise da Precipitação Pluviométrica em Anos Extremos no Cariri Paraibano e suas Consequências na Agricultura e Cobertura Vegetal**. Dissertação de Mestrado, Campina Grande, 2017.

SERAFIM-FILHO, G. L.; SANTOS, L. L., SOUZA; S. M. A.; RODAL, M. J. N.; MELO, J. I. M.; SALES, M. F. Florística e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea em duas áreas sedimentares do Parque Nacional do Catimbau, Buíque, Pernambuco, Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 6, n. 2, 2021.

SFAIR, J. C. *et al.* Chronic human disturbance affects plant trait distribution in a seasonally dry tropical forest. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 2, 2018.

ŠILHAVÝ, J.; MINÁR, J.; MENTLÍK, P.; SLÁDEK, J. A new artefacts resistant method for automatic lineament extraction using Multi-Hillshade Hierarchic Clustering (MHHC). **Computers and Geosciences**, v. 92, p. 9-20, 2016.

SILVA FILHO, R. D.; VASCONCELOS, R. S.; GALVÃO, C. D. O.; RUFINO, I. A. A.; CUNHA, J. E. D. B. L. Representação matemática do comportamento intra-anual do NDVI no Bioma Caatinga. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 473-488, 2020.

SILVA, G. J. F. *et al.* Correction to: Spatiotemporal variability of vegetation due to drought dynamics (2012–2017): a case study of the Upper Paraíba River basin, Brazil. **Natural Hazards**, v. 102, n.3, p.939-964, 2020.

SILVA, Janaína Barbosa da. **Sensoriamento Remoto Aplicado ao Estudo do Ecossistema Manguezal em Pernambuco**. Pernambuco, 2012. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 188p. 2012.

SILVA, S. G.; GALVÍNCIO, J. D. Análise comparativa da variação nos Índices NDVI e SAVI no sítio PELD–22. Petrolina–PE, na primeira década do século XXI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 6, p. 1446-1456, 2012.

SIMÕES, Ewerton Medeiros; DE LIMA, Joedla Rodrigues; DE MENDONÇA, Izaque Francisco Candeia. Índice de vegetação por diferença normalizada associado às variáveis pluviométricas para a sub-bacia do Rio Espinharas–PB/RN. **Nativa**, v. 9, n. 1, p. 106-114, 2021.

SIYUM, Z. G. **Tropical dry forest dynamics in the context of climate change: syntheses of drivers, gaps, and management perspectives** *Ecological Processes*, 2020.

SOBRINO, JA; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.-C.; PAOLINI, L. **Recuperação da temperatura da superfície da terra do LANDSAT TM 5**. *Remote Sens. Environ.* 2004, 90, 434–440.

SOUSA, J. H. S.; NASCIMENTO RIBEIRO, G.; FRANCISCO, P. R. M.; SILVA JÚNIOR, O. A.; SILVA, L. H. G. T.; NÓBREGA, J. L. Índices biofísicos da bacia hidrográfica do rio Sucuru-PB utilizando o Google Earth Engine. **Revista Geama**, v. 9, n. 3, p. 86-94, 2023.

- SOUZA, J. O. P. de. **Modelos de evolução da dinâmica fluvial em ambiente semiárido–bacia do açude do saco, Serra Talhada, Pernambuco.** 2014. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 191p. 2014.
- SOUZA, J. O. P. de. **Sistema fluvial e açudagem no semi-árido, relação entre a conectividade da paisagem e dinâmica da precipitação, na bacia de drenagem do riacho do saco, Serra Talhada, Pernambuco.** Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 172p. 2011.
- SOUZA, Jonas; HOOKE, Janet. Influence of seasonal vegetation dynamics on hydrological connectivity in tropical drylands. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 11, p. e14427, 2021.
- SOUZA, R., FENG, X., ANTONINO, A., MONTENEGRO, S., SOUZA, E., PORPORATO, A. Vegetation response to rainfall seasonality and interannual variability in tropical dry forests. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 20, p. 3583-3595, 2016.
- STAN, K.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. **Tropical dry forest diversity, climatic response, and resilience in a changing climate** Forests, 2019.
- STOTT, P. A. *et al.* Nature and Dynamics of Forest-Savanna Boundaries. **The Journal of Ecology**, v. 82, n. 3, 1994.
- SUN, Y., YANG, Y., ZHANG, Y. E WANG, Z. Assessing vegetation dynamics and their relationships with climatic variability in northern China. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 87–88, 2015.
- SVOBODA, Mark; HAYES, Michael; WOOD, Deborah. **Standardized precipitation index: user guide.** 2012.
- SWAINE, M. D. Characteristics of dry forest in West Africa and the influence of fire. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, n. 3, 1992.
- TESTA, S.; SOUDANI, K.; BOSCHETTI, L.; MONDINO, E.B. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, p. 132-144, 2018.
- THORNES, J. B.; BRUNSDEN, D. **Geomorphology & Time.** London: Methuen & Co, 1977.
- VALDEZ-HERNÁNDEZ, M. Planta vegetativa e reprodutiva fenologia. In: ISLEBE, G.; CALMÉ, S.; LEÓN, J.; SCHMOK, B. **Biodiversidade e conservação da Península de Yucatán, México.** Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2015. p. 57-96.
- VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da Vegetação Brasileira Adaptada a um Sistema Universal.** IBGE, 1991.
- VERDUZCO, VS; GARATUZA-PAYÁN J.; YÉPEZ, E.A; WATTS, C.J.; RODRÍGUEZ, J.C; ROBLES-MORUA, A.; VIVONI, E.R. 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.
- VICO, G.; THOMPSON, S.E; MANZONI, S.; MOLINI, A.; ALBERTSON, J.D; ALMEIDA-CORTEZ, J.S; PORPORATO, A. Climatic, ecophysiological, and

phenological controls on plant ecohydrological strategies in seasonally dry ecosystems. **Ecohydrology**, v. 8, n. 4, p. 660-681, 2015.

VIEIRA DE AZEVEDO, P.; LUCIA BEZERRA ALVES, T. Análise da variação espacial e temporal do índice de vegetação e sua relação com parâmetros climáticos na Bacia Hidrográfica do Alto Curso do rio Paraíba, estado da Paraíba, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, 2015.

VIRMANI, S.; SIVAKUMAR, M.; REDDY, S. **Classificação climática de trópicos semi-áridos em relação à pesquisa de sistemas agrícolas**, 1980.

WANG, B; CHENG, W. Geomorphic influences on land use/cover diversity and pattern. **Catena**. v1, n.230. 2023

WEN, W.; ZHANG, W.; HE, S.; HU, H.; QIAO, H.; WANG, X.; YUAN, J. The Classification of Log Decay Classes and an Analysis of Their Physical and Chemical Characteristics Based on Artificial Neural Networks and K-Means Clustering. **Forests**, v. 14, n. 4, p. 852, 2023.

WHITMORE, T. C. Tropical forest disturbance, disappearance, and species loss. In: **Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities**. [s.l: s.n.].

WHITNEY, B. S. *et al.* Sensitivity of Bolivian seasonally-dry tropical forest to precipitation and temperature changes over glacial-interglacial timescales. **Vegetation History and Archaeobotany**, v. 23, n. 1, 2014.

WONG, MMF; FUNG, JCH; YEUNG, PPS **Cálculo de alta resolução da fração da vegetação urbana no Delta do Rio das Pérolas do Sentinel-2 NDVI para parametrização do modelo de clima urbano**. **Geosci. Lett.** 2019, 6, 2.

WRIGHT, C. L.; LIMA, A. L., SOUZA, E. S.; WEST, J. B.; WILCOX, B. P. 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, 11808-11825. 2021

WU, J.; CHAVANA-BRYANT, C.; PROHASKA, N.; SERBIN, S. P.; GUAN, K.; ALBERT, L. P.; SALESKA, S. R. Convergence in relationships between leaf traits, spectra and age across diverse canopy environments and two contrasting tropical forests. **New Phytologist**, v. 214, n. 3, p. 1033-1048, 2017.

XUE, J.; SU, B. **Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications** **Journal of Sensors**, 2017.

YANG, Yaqian; LIU, Jintao; YANG, Shuang; ELE, Ruimin. Understanding the hierarchical controls of geographical features on hydrological responses in humid mountainous areas through a stepwise clustering scheme. **Avaliação de risco de Stoch Environ Res**, v.36, p. 1521–1540, 2022.

ZANELLA, A., ZANELLA, A. C. B., RIBEIRO, A., FERRAZ FILHO, A. C., e ROCHA, A. D. C. Fenologia de cinco espécies arbóreas da Caatinga no sudoeste do Piauí. In: 9º Congresso Florestal Brasileiro. 2022. p. 82-85.

ZHENG, Z.; XIAO, X.; ZHONG, Z. C.; ZANG, Y.; YANG, N.; TU, J.; LI, D. A rapid and high-precision mountain vertex extraction method based on hotspot analysis clustering

and improved eight-connected extraction algorithms for digital elevation models. *Remote Sensing*, v. 13, n. 1, p. 81, 2020.

ZOU L; CAO S; ZHAO A; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. Assessing the temporal response of tropical dry forests to meteorological drought. **Remote Sensing**. Jul 21;12(14):2341. 2020.