



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO (PPGCGTG)

UILKA ELISA TAVARES

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS MULTIFONTE DA
COBERTURA DO SOLO EM REGIÃO SEMIÁRIDA – BIOMA CAATINGA**

Recife
2022

UILKA ELISA TAVARES

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS MULTIFONTE DA
COBERTURA DO SOLO EM REGIÃO SEMIÁRIDA – BIOMA CAATINGA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG) da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientador: Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Junior

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Josias Machado, CRB-4 / 1690

T231a Tavares, Uilka Elisa.
Análise das características espectrais multifonte da cobertura do solo em Região Semiárida – Bioma Caatinga / Uilka Elisa Tavares. – 2022.
73 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Junior.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação 2021.
Inclui referências.

1. Ciências Geodésicas 2. Múltiplos sensores. 3. Índices físicos. 4. CBERS-4. 5. Landsat-8. I. Tavares Junior, João Rodrigues (orientador). II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-274

UILKA ELISA TAVARES

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS MULTIFONTE DA
COBERTURA DO SOLO EM REGIÃO SEMIÁRIDA – BIOMA CAATINGA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG) da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em:18/04/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Júnior (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa Dra Ana Lúcia Bezerra Candeias (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa Dra Gérsica Moraes Nogueira da Silva (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

Gostaria de dedicar esta pesquisa a Lady P. B e a Pixie.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, que me deu força para concluir esta etapa de minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Júnior pela orientação e correção da pesquisa neste período atípico de pandemia. Da mesma forma agradeço a Prof^a. Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias e a Prof^a. Dr^a. Gércica Nogueira da Silva pelas contribuições nas defesas de projeto e qualificação. Também agradeço aos professores e colegas do Mestrado que conheci nas aulas remotas.

Agradeço a UFPE, juntamente, com a PPGCGTG, que me proporcionaram meios para que esse trabalho fosse realizado.

Por fim, agradeço a minha família por todo apoio e por ter ficado em casa durante a pandemia e agora, passado mais de um ano meio, aguardamos por melhores dias para todos.

RESUMO

A presente pesquisa teve por objetivo analisar as características espectrais da cobertura do solo de uma parte da região semiárida de Pernambuco, por meio de índices físicos e com diferentes sensores orbitais aplicando integração multifonte. Para tanto, foram obtidas imagens dos sensores OLI do satélite LANDSAT-8 e MUX e PAN do satélite CBERS-4 da região do Polo Gesseiro do Araripe e APA da Chapada do Araripe. Para o pré-processamento, as imagens foram reprojatadas para o sistema Sirgas/2000 24s, e foi aplicada correção radiométrica e conversão de ND para reflectância. Foram gerados os índices NDVI, NDWI, NDBI e albedo para os sensores MUX e OLI para o estudo das características espectrais da região. Adicionalmente, foi gerado o índice NDVI a partir da fusão das bandas do sensor MUX e da banda pancromática do sensor PAN para avaliar o resultado da integração multifonte de diferentes sensores. Os produtos obtidos foram analisados por comparação visual e por correlação. Também foram extraídas amostras da vegetação, área urbana, corpos hídricos e pastagem para analisar estas feições por estatística descritiva. Para o Polo Gesseiro, os resultados indicaram melhor resolução espacial para o NDVI do sensor MUX e sua versão fusionada com o sensor PAN, o qual apresentou melhor detalhamento da cena e forte correlação entre estes índices. Os NDVIs obtidos pelos sensores MUX, PAN e OLI representaram visualmente de forma satisfatória a dependência da vegetação pela precipitação. O NDWI gerado pelos sensores MUX e OLI por outro lado, apresentaram média correlação. Em relação à APA da Chapada do Araripe, o NDVI e NDWI se destacaram no estudo da resposta da vegetação sob condições de seca e precipitação. O índice NDBI e o albedo não apresentaram distinção entre os meses estudados. O uso do sensoriamento remoto mostrou-se eficiente no monitoramento de uso e ocupação do solo de áreas do Polo Gesseiro e da APA da Chapada, sugere-se que trabalhos futuros podem utilizar outros índices e outros sensores para estudar estas duas áreas de grande relevância ambiental e econômica.

Palavras-chave: múltiplos sensores; índices físicos; CBERS-4; Landsat-8.

ABSTRACT

This research aimed to analyze the spectral characteristics of land cover in a part of the semiarid region of Pernambuco, through physical indices and with different orbital sensors applying multisource integration. For this purpose, images were obtained from the OLI sensors of the LANDSAT-8 and MUX and PAN sensors of the CBERS-4 satellite of the region of the Polo Gesseiro do Araripe and APA da Chapada do Araripe. For pre-processing, the images were reprojected to the Sirgas/2000 24s system, and radiometric correction and conversion from ND to reflectance were applied. NDVI, NDWI, NDBI and albedo indices were generated for the MUX and OLI sensors to study the spectral characteristics of the region. Additionally, the NDVI index was generated with the fusion of the MUX sensor bands and the panchromatic band of the PAN sensor to evaluate the result of the multisource integration of different sensors. The products obtained were analyzed by visual comparison and by correlation. Samples of vegetation, urban area, water bodies and pasture were also extracted to analyze these descriptive statistical features. For the Polo Gesseiro, the results indicated better spatial resolution for NDVI of the MUX sensor and its fused version with the PAN sensor, which presented better detail of the scene and strong correlation between these indices. The NDVI indices obtained by the MUX, PAN and OLI sensors visually represented satisfactorily the dependence of vegetation on precipitation. The NDWI generated by the sensors and MUX and OLI on the other hand, showed a medium correlation. Regarding the Chapada do Araripe APA, the NDVI and NDWI stood out in the study of vegetation response under drought and precipitation conditions. The NDBI index and the albedo showed no distinction between the months studied. The use of remote sensing proved to be efficient in monitoring land use and occupation in areas of the Gesseiro Pole and Chapada APA, it is suggested that future work can use other indices and other sensors to study these two areas of great environmental relevance and economical.

Keywords: multiple sensors; physical índices; CBERS-4; LANDSAT-8.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Semiárido brasileiro e os biomas Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica	17
Figura 2 –	Bioma Caatinga	19
Figura 3 –	Polo Gesseiro e APA Chapada do Araripe A) Presença de rodovias e vilas; B) Ocorrência de minas de gipsita e áreas antropizadas	24
Figura 4 –	Resposta espectral relativa do sensor MUX (CBERS-4) e OLI (LANDSAT-8)	28
Figura 5 –	Polo Gesseiro e APA chapada do Araripe	39
Figura 6 –	Precipitação de 2019 para A) Polo Gesseiro (estação Ouricuri); B) APA da Chapada do Araripe (estações Ouricuri, Campos Sales, Barbalha, Crateus).....	40
Figura 7 –	Polo Gesseiro: A) $NDVI_{OLI}$; B) $NDVI_{MUX}$; C) $NDVI_{FUSÃO}$	46
Figura 8 –	Histograma do NDVI	47
Figura 9 –	Açude São Pedro, Trindade-PE A) NDVI MAPBIOMAS; B) $NDVI_{OLI}$, C) $NDVI_{MUX}$, e D) $NDVI_{FUSÃO}$	48
Figura 10 –	Box-plot para o $NDVI_{OLI}$, $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ para as feições A) Urbano, B) Savânico; C) Pastagem; D) Rio, lago e oceano	49
Figura 11 –	Polo Gesseiro por índice de água A) $NDWI_{OLI}$, B) $NDWI_{MUX}$; Açude São Pedro, Trindade-PE C) $NDWI_{OLI}$, D) $NDWI_{MUX}$	50
Figura 12 –	Box-plot para o $NDWI_{OLI}$, $NDWI_{MUX}$	52
Figura 13 –	APA da Chapada do Araripe pela classificação MAPBIOMAS	54
Figura 14 –	Índices NDVI de A) setembro e B) dezembro, NDWI de C) setembro e D) dezembro, NDBI de E) setembro e F) dezembro e Albedo de G) setembro e H) dezembro	55
Figura 15 –	Açude Paraíso, Araripe-CE: A) NDVI (setembro), B) NDVI (dezembro), E) NDWI (setembro), F) NDWI (dezembro) , I) NDBI (setembro), J) NDBI (dezembro), N) Albedo (setembro) , O) Albedo (dezembro); Complexo ambiental Mirante do Caldas, Barbalha-CE: C) NDVI (setembro), D) NDVI (dezembro), G) 60	

NDWI (setembro), H) NDWI (dezembro) , L) NDBI (setembro),
M) NDBI (dezembro), P) Albedo (setembro) , Q) Albedo
(dezembro).....

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Caracterização do bioma Caatinga por Região Fitoecológica agrupada	19
Tabela 2 –	Informações sociais e econômicas dos municípios que compõe o polo gesseiro do Araripe	21
Tabela 3 –	Características das câmaras PAN e MUX (CBERS-4) e do sensor OLI (LANDSAT-8)	28
Tabela 4 –	Coeficientes de Calibração e irradiância espectral no topo da atmosfera para o CBERS-4 MUX, PAN, WFI e IRS.....	30
Tabela 5 –	Pesquisas em sensoriamento remoto nos últimos anos para os satélites CBERS-4 e LANDSAT-8	36
Tabela 6 –	Imagens CBERS-4 e Landsat-8 obtidas para a Área de estudo.	41
Tabela 7 –	NDVI de Arcoverde, PE	45
Tabela 8 –	Extração de polígonos na região do Polo gesseiro.....	45
Tabela 9 –	Estatística descritiva dos índices de vegetação.....	52
Tabela 10 –	Correlação dos índices de vegetação para o Polo Gesseiro	53
Tabela 11 –	Média das amostras de pixels para áreas de vegetação florestal, savânica, pastagem e lavoura e média da área total..	58
Tabela 12 –	Correlação dos índices de vegetação para a APA da Chapada do Araripe em 2019	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental
APL	Arranjo Produtivo Local
SR	Sensoriamento Remoto
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
CAMC	Complexo Ambiental Mirante do Caldas
CBERS-4	China-Brazil Earth Resources Satellite
DAS	Dia Sequencial do Ano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de desenvolvimento humano
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
IRS	Imageador Multiespectral e Termal
LMLV	local mean and variance matching
MIR	mid-range infrared
MMA	Ministério do meio ambiente
MS	Multiespectral
MUX	Câmera Multiespectral Regular
NDBI	Normalized Difference Built Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized difference Water Index
OLI	Operational Land Imager
PAN	Câmera Pancromática e Multiespectral
SCP	Semi-Automatic Classification
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVO.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1	SEMIÁRIDO E SEUS BIOMAS.....	16
3.2	POLO GESSEIRO E SEUS MUNICÍPIOS.....	20
3.3	APA DA CHAPADA DO ARARIPE.....	22
3.4	FUSÃO DE IMAGENS.....	25
3.5	SATÉLITES LANDSAT-8 E CBERS-4.....	26
3.6	TRANSFORMAÇÃO DE ND PARA REFLECTÂNCIA.....	29
3.7	ÍNDICES NDVI, NDWI, NDBI E O ALBEDO.....	32
4	ESTADO DA ARTE.....	34
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
5.1	ÁREA DE ESTUDO.....	39
5.2	IMAGENS DE SR DA ÁREA DE ESTUDO.....	40
5.3	PRE-PROCESSAMENTO.....	41
5.4	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS.....	42
5.5	ANÁLISES.....	44
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
6.1	POLO GESSEIRO.....	46
6.2	APA DA CHAPADA DO ARARIPE.....	53
7	CONCLUSÕES.....	62
8	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

A Caatinga é um bioma que ocorre apenas na região nordeste do Brasil. Apesar da rica biodiversidade, a Caatinga é uma das florestas mais vulneráveis no mundo, tanto por ser uma região altamente dependente da precipitação, quanto pela ação antrópica. Imagens de satélite obtidas por Sensoriamento Remoto (SR) apontaram grandes perdas de vegetação densa, principalmente devido exploração agrícola, pecuária e mineração (SILVA e CRUZ, 2018).

O SR é um sistema de imageamento extremamente útil para monitorar grandes áreas (SANTOS et al., 2020b; ALVINO et al., 2020). Os satélites fornecem uma grande variedade de imagens que podem variar a resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal.

As técnicas aplicadas nas imagens de SR vão contribuir para avaliar o comportamento espectral e multiespectral do local de estudo. Dentre as técnicas aplicadas em SR da superfície terrestre, destacam-se a integração multiespectral e a integração multifonte.

Pela integração multiespectral diversos índices de vegetação foram elaborados ao longo dos anos. Os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built Index*) e o albedo são muito utilizados no sensoriamento remoto e trabalham com a relação de diferentes bandas espectrais como a reflectância do infravermelho próximo (NIR), a banda do vermelho e o espectro de infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Estes índices auxiliam na classificação de diferentes elementos terrestres como o solo, água, área urbana e vegetação em uma imagem orbital. Mas segundo pesquisas, os índices podem ser influenciados pelo clima da região em que foram desenvolvidos, e não ser adequados para distinguir as características espectrais em outras regiões, o que se sugere mais investigações em diferentes localidades e o desenvolvimento de novos índices.

Outra técnica aplicada ao SR é a análise das características espectrais com o uso de imagens de múltiplos sensores (integração multifonte), em que diversas pesquisas demonstraram o seu potencial. Na análise multifonte, os sensores MUX

do satélite CBERS-4 e o sensor OLI do satélite LANDSAT-8, possuem algumas bandas espectrais com comprimento de onda semelhantes criando a possibilidade de uma correspondência entre sensores após aplicação de um fator de ajuste entre os sensores.

Desta forma, este trabalho de pesquisa propõe analisar as características espectrais multifonte da cobertura do solo em uma região semiárida, a saber, na Mesorregião do Sertão do Estado de Pernambuco, por meio de índices de vegetação e o albedo para os sistemas sensores OLI do LANDSAT-8 e MUX e PAN do CBERS-4. A hipótese da pesquisa é que a utilização de múltiplos sensores permite analisar correlações espectrais entre índices de vegetação e o albedo de objetos da cobertura do solo (cobertura vegetal, desmatamentos, solo exposto, copos hídricos e área urbana).

Esta pesquisa está apoiada no projeto “análise multifonte de imagens de sensoriamento remoto” coordenado pelo Prof. João Rodrigues Tavares Junior, coordenador do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais do Departamento de Engenharia Cartográfica, CTG-UFPE.

Uma revisão de literatura é apresentada sobre os temas relacionados aos satélites CBERS-4 e LANDSAT-8, comportamento espectral, integração multiespectral e índices de vegetação e o uso de múltiplos sensores, e técnica multifonte direcionados ao semiárido e à caatinga.

2 OBJETIVO

Nesta seção serão apresentados a seguir os objetivos desta dissertação, subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as características espectrais da cobertura do solo da região semiárida de Pernambuco, Mesorregião do Sertão de Pernambuco, por meio de índices físicos e albedo para os sistemas sensores OLI do satélite LANDSAT-8 e MUX e PAN do satélite CBERS-4 para diferentes precipitações mensais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a resposta espectral da vegetação da APA da Chapada do Araripe após diferentes precipitações acumuladas mensais com os índices NDVI, NDWI, NDBI e albedo;
- Analisar a sensibilidade espectral para a cobertura do solo do Polo Gesseiro por meio dos índices NDVI e NDWI obtidos pelos sistemas sensores OLI do LANDSAT 8, MUX e PAN do CBERS-4 no mês de outubro de 2019.
- Analisar a correlação espectral entre os índices NDVI e NDWI dos sensores OLI e MUX e PAN para a cobertura do solo do Polo Gesseiro.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SEMIÁRIDO E SEUS BIOMAS

Segundo o IBGE (2018), o Semiárido brasileiro é uma região delimitada pela SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste) em que predominam índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50, o percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60% e precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm.

A área total da região semiárida é de 1,03 milhão de km² (Resolução 115, de 23 de novembro de 2017) distribuída pelos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais.

Segundo Moura et al., (2007), a região semiárida possui um balanço hídrico negativo com precipitação irregular e anual de 800mm contra evaporação de 2000 mm anuais, com forte insolação de 2800 h ano⁻¹ e temperaturas entre 23 e 27°. As chuvas da região são propensas a ocorrer de forma torrencial, pois se concentram em períodos de 3 a 5 meses durante o ano com maior concentração entre dezembro e janeiro (RAMALHO et al., 2013).

Santos et al. (2017) ao estudar a precipitação no semiárido verificaram alta variação espacial e temporal de chuvas, com estação chuvosa ocorrendo predominantemente na parte sudeste da região. A média histórica observada pelos autores foi de 727 mm, destacando-se o ano de 2009 como o mais chuvoso com média de 873 mm e 2012 como o ano mais seco com média de 435 mm.

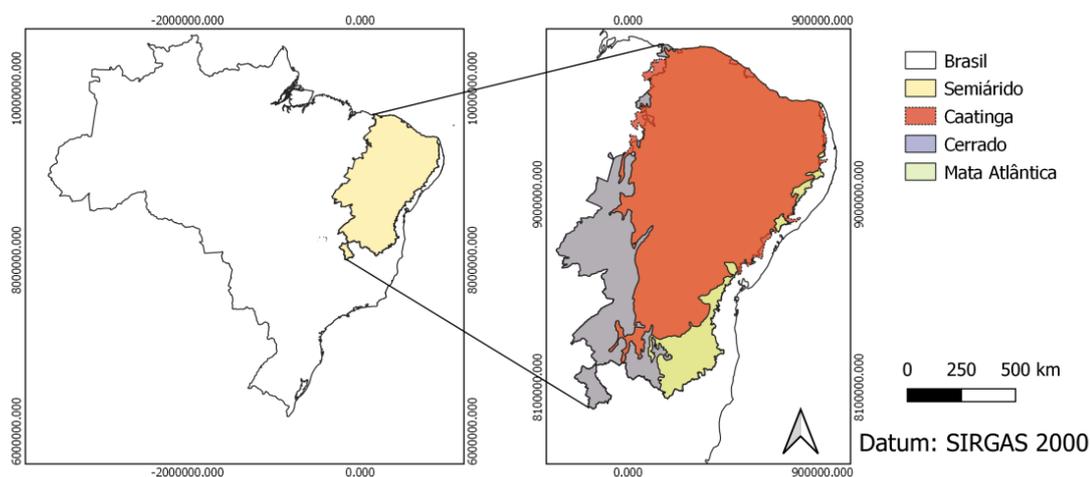
Segundo Medeiros et al. (2012), no ano de 2010, o semiárido possuía 22.598.318 habitantes distribuídos em 1.135 municípios, com densidade demográfica de 23,60. No semiárido, 93,39% dos municípios são classificados como municípios com pequena população (até 50000 habitantes); 5% dos municípios são classificados como média população (50000 até 100000 habitantes) e 1% dos municípios é classificado como grande população (acima de 100000 habitantes).

O semiárido brasileiro é considerado um dos mais povoados dentre as regiões semiáridas que existem no mundo. Pelos desafios climáticos e as formas de interagir com a região, seus residentes enfrentam graves desafios sociais,

estruturais e econômicos (MOURA et al., 2007). Silva (2003) destaca que ao longo dos anos, o semiárido tem sido encarado sob dois paradigmas: o da modernidade em que predomina a dominação da natureza e conseqüente exploração de recursos naturais e o da sustentabilidade com visão ecológica de convivência com o semiárido.

Três biomas estão presentes no semiárido: a Caatinga, o Cerrado e a Mata Atlântica. Apenas o bioma Caatinga está totalmente inserido na região semiárida ocupando aproximadamente 70% da região. O bioma Cerrado e Mata Atlântica localizam-se parcialmente na região semiárida e ocupam aproximadamente 20% e 7% da área (Figura 1).

Figura 1 - Semiárido brasileiro e os biomas Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica



Fonte: a autora

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, ocupando cerca de 22% do território brasileiro, ocorrendo nos estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e Distrito Federal, Amapá, Roraima e Amazonas.

O Cerrado possui abundante diversidade biológica, sendo uma das savanas mais ricas do mundo, e seus recursos naturais servem para sustentar povos indígenas, quilombolas, geraizeiros, ribeirinhos, babaçueiras, vazanteiros que ali vivem. Apesar de sua importância biológica, o Cerrado vem sofrendo degradação

tanto devido à expansão agropecuária na área quanto à extração de material lenhoso para produção de carvão (MMA, 2018b).

Segundo o MMA (2018c), a Mata Atlântica possui uma região que é considerada uma das mais ricas do mundo em biodiversidade, com florestas ombrófila densa, mista e aberta, floresta estacional semidecidual e decidual e outros sistemas como manguezais, restingas, campos, brejos e encaves. Ao longo dos anos, a Mata Atlântica foi reduzida em sua extensão de 1,3 milhões de km² para apenas 29% de sua área original, principalmente devido à exploração humana.

Ainda segundo o MMA (2018c), A Mata Atlântica é responsável:

“pela produção, regulação e abastecimento de água; regulação e equilíbrio climáticos; proteção de encostas e atenuação de desastres; fertilidade e proteção do solo; produção de alimentos, madeira, fibras, óleos e remédios; além de proporcionar paisagens cênicas e preservar um patrimônio histórico e cultural imenso.”

Diferente dos biomas Cerrado e Mata Atlântica que estão inseridos em diferentes regiões climáticas e figuram em uma pequena parcela no semiárido, a Caatinga está totalmente inserida na região semiárida. A Caatinga se estende pelos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e o norte de Minas Gerais, ocupando 844.453 km² (MMA, 2018a). Da região o seu nome significa “mata branca”, devido à cor que vegetação assume nos períodos de seca (FUNDAJ, 2019).

A fauna e a flora do bioma Caatinga são adaptadas ao clima semiárido, e a região é altamente dependente da precipitação o que a torna, segundo Cunha et al. (2020), uma das florestas mais vulneráveis no mundo.

A flora é composta por arbustos que perdem as folhas em épocas secas para reter água, cactáceas, mandacaru, e xique-xique, além de cactos e bromélias, espécies mais adaptadas em regiões secas. Em melhores condições de umidade, a Caatinga possui árvores como juazeiro, aroeira e baraúna. Apesar da rica biodiversidade, a Caatinga tem sido desmatada de forma ilegal principalmente para

extração de lenha e criação de áreas para pasto (MMA, 2018a). Dados de 2002 demonstram que da área original, 36% são agora áreas antrópicas (Tabela 1).

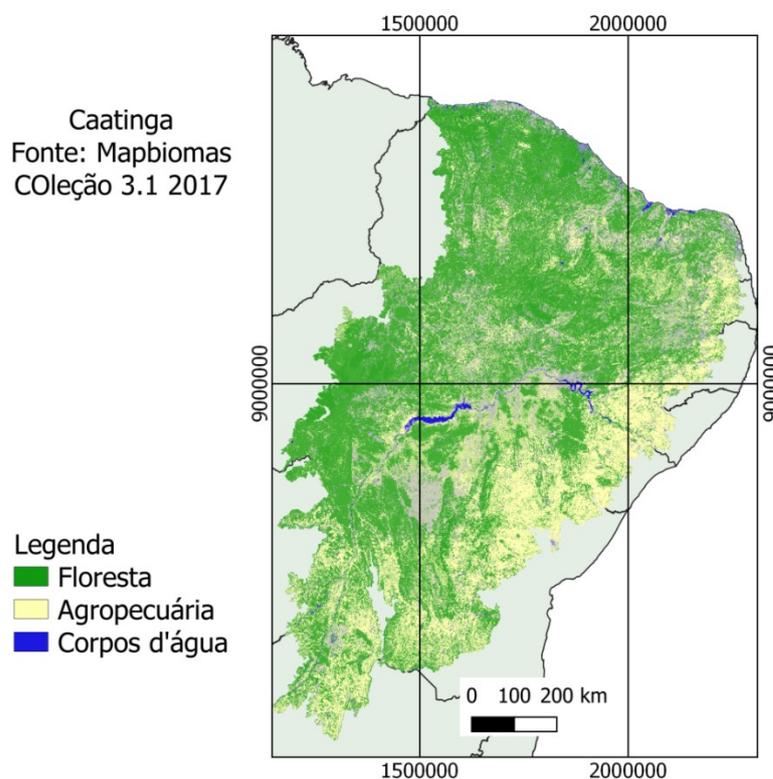
Tabela 1 - Caracterização do bioma Caatinga por Região Fitoecológica agrupada

Região Fitoecológica Agrupada	Área (Km ²)	%
Vegetação Nativa Florestal	201.428,00	24,39
Vegetação Nativa Não-Florestal	316.889,00	38,38
Áreas Antrópicas	299.616,00	36,28
Água	7.817,00	0,95
Total	825.750,00	100,00

Fonte: MMA, 2018a

O clima da Caatinga apresenta estação seca e pluviosidade irregular. O relevo varia entre o planalto da Borborema (ao oriente), depressões, chapadas e chapadões (parte meridional), e o espinhaço (entre Bahia e Minas Gerais) (Figura 2).

Figura 2 – Bioma Caatinga.



Fonte: Mapbiomas, 2018a.

Neste cenário, Santos et al. (2020a) verificaram por meio de sensoriamento remoto desmatamento entre os anos de 2000 e 2018, e observaram que a ausência de políticas públicas para preservação ambiental contribuiu para o avanço do desmatamento.

No caso do bioma Caatinga, séries temporais com imagens de NDVI demonstraram que a presença da vegetação nativa promove melhor convivência com a seca, em que áreas de proteção ambiental integral apresentaram maior produtividade e maior resiliência à seca quando comparado às áreas de uso sustentável ou áreas desprotegidas (SALVATIERRA et al., 2017).

3.2 POLO GESSEIRO E SEUS MUNICÍPIOS

O Brasil é o maior produtor de gesso da América do Sul e o 20º do mundo, com uma produção de aproximadamente 2,1 Mt em 2017, valor que representou 0,8% do total mundial (BRASIL, 2020).

Segundo Gadelha (2015), o polo gesseiro do Araripe encontra-se no extremo oeste do estado de Pernambuco, inserido no semiárido e no bioma Caatinga, e é composto pelos municípios de Araripina, Bodocó, Exu, Granito, Ipubi, Moreilândia, Ouricuri, Santa Cruz, Santa Filomena, e Trindade.

O pólo gesseiro do Araripe, atualmente classificado como Arranjo Produtivo Local (**APL**), responde por 97% da produção de gesso no Brasil (SINDUGESSO, 2014). Segundo Santos e El-deir (2019) existem 42 minas de gipsita, 174 indústrias de calcinação e 748 indústrias de pré-moldados no polo Gesseiro, que geram uma receita de R\$ 1,4 bilhão/ano para região.

O polo gesseiro do Araripe incentiva a geração de emprego e renda para a região, além de trazer investimentos (ARAÚJO, 2014). O polo gesseiro gera em torno de 13800 empregos diretos e 69000 empregos indiretos e os municípios apresentam um IDH médio (0,637).

Em 2017, a exportação do gesso ocorreu sob a forma de Pastéis, carvões, gizes para escrever/desenhar e de alfaiate (14,2%), Chapas, placas, painéis, ladrilhos e semelhantes (27,6%) e outras formas de gesso (54,7%). Os principais

países a receber a exportação foram Paraguai (60%), Bolívia (14%), Colômbia (6%), Equador (6%) e Uruguai (4%) (QUEIROZ FILHO, 2018).

A reserva de gesso do polo gesseiro da chapada do Araripe é da ordem de um bilhão de toneladas de minério bruto, e apesar do grande potencial, os empreendimentos neste setor sofrem com dificuldades de logística para transportar e a carga tributária que entram o crescimento do empreendimento (SINDUSGESSO, 2017).

Com a crise na construção civil no ano de 2017, o Brasil apresentou uma redução da produção de gesso, da importação, do consumo interno e da requisição para pesquisa de gipsita em relação ao ano passado (QUEIROZ FILHO, 2018).

Do ponto de vista social, o comparativo do censo 2010 a 2020 apresentou crescimento populacional para todos os municípios do polo Gesseiro, com variação de 0,4% de crescimento para Exu e 15% para Trindade (Tabela 2) e Trindade também é o município com maior densidade demográfica. Araripina se destaca com o maior PIB e Exu com o menor.

Tabela 2 - Informações sociais e econômicas dos municípios que compõe o polo gesseiro do Araripe

Municípios	População		D.demo. 2010 hab./km ²	PIB 2018 (R\$)	IDHM 2010	Área [2019] (km ²)	Esgoto [2010] (%)	Arboriza -ção(%) 2010	Urba [2010] (%)
	2020	2010							
Araripina	84864	77302	40,84	12298,15	0,602	2037,39	45,6	68,4	1,1
Bodocó	38378	35158	21,7	7300,54	0,565	1621,79	24,5	88,8	2,8
Exu	31766	31636	23,65	8417,2	0,576	1336,79	16,9	87,7	1,7
Granito	7537	6855	13,13	9237,86	0,595	521,69	29,8	46,1	0
Ipubi	31187	28120	32,64	9606,75	0,550	693,914	20,9	61,3	1,2
Moreilândia	11270	11132	27,52	7259,99	0,600	404,287	11,2	87,5	20,5
Ouricuri	69969	64358	26,56	9671,52	0,572	2381,57	58,3	90,8	3,4
Santa cruz	15558	13594	10,82	7137,75	0,549	1245,98	25,3	84,5	5,3
Santa Filomena	14562	13371	13,3	6809,16	0,533	1005,34	8,6	73,6	26,4
Trindade	30816	26116	113,77	10451,1	0,595	295,765	42,4	80,4	0,9

Fonte: IBGE cidades

Os melhores índices de urbanização adequada das vias públicas (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio) são para os municípios de Moreilândia e Santa Filomena. Em relação ao esgotamento sanitário, apenas Ouricuri apresenta a melhor condição, mas ainda assim está abaixo da média nacional de 60% da

população com coleta de esgoto. A Arborização das vias públicas é relativamente alta para a maioria dos municípios, com exceção de Granito.

Perrella (2017) verificou que a grande quantidade de empreendimentos na região é o responsável pela degradação do solo e da cobertura vegetal que vem sendo consumida como fonte de energia nos municípios de Trindade e Ipubi.

Apesar da relevância econômica, o polo gesseiro do Araripe causa impactos ambientais negativos na região, como poluição do ar como o óxido de enxofre, solo e água pelo gesso, extração da cobertura vegetal nativa (SANTOS e EL-DEIR, 2019). Nesse contexto, destacam-se potencialidades a serem desenvolvidas como obter outra fonte de energia que substitua a mata nativa e redução do impacto ambiental pela exploração mineral.

Segundo MMA (2018a), apenas 10% da lenha utilizada para calcinação do gesso é proveniente de PMFS (Planos de Manejo Florestal Sustentado); algaroba e poda de frutíferas contribuem com 20%; eucalipto 5%; e 65% são de exploração florestal não autorizada e/ou de mudança do uso do solo.

O processo que utiliza a lenha para calcinação da gipsita é considerado primitivo, poluidor e pouco eficiente para Urbano (2013), em que se destaca o não aproveitamento dos gases quentes que são lançados pelas chaminés dos fornos.

Fernandes e Barbosa (2011) realizaram análise de classes de uso do solo no município de Araripina para estudar a degradação ambiental nos anos de 1987 e 2008 desta região, e verificaram que apenas 0,59% restaram da vegetação densa, principalmente devida exploração agrícola, pecuária e para suprir a matriz energética de empresas de mineração, classificando a degradação como grave com áreas com potencial a desertificação.

3.3 APA DA CHAPADA DO ARARIPE

A Área de Proteção Ambiental (APA) da Chapada do Araripe foi criada através de Decreto Federal (S/N), de 04 de agosto de 1997 e encontra-se na divisa dos estados de Pernambuco e Ceará. Este decreto estabelece que a criação da APA da Chapada do Araripe tem por objetivos proteger fauna, flora e sítios cênicos, e incentivar atividades relacionadas a conservação ambiental. Além disso, o decreto

delimitou as áreas que compõem a APA e determinou os usos permitidos e restringidos. Pela Lei Nº 9985/2000, todas as áreas classificadas como APA enquadram-se no grupo das Unidades de Conservação do tipo Uso Sustentável que permite o uso das terras de forma sustentável e com atividades que promovam a conservação da natureza.

A chapada do Araripe está sob a coordenação geral da CR5 Parnaíba/PI e engloba os municípios de Barbalha, Brejo Santo, Campos Sales, Crato, Jardim Jati, Missão Velha, Nova Olinda, Penaforte, Abaiara das UFs PI/CE/PE segundo o ato legal DEC S/N de 04/08/1997 e possui área de 6.066 km² (ICMBIO, 2019).

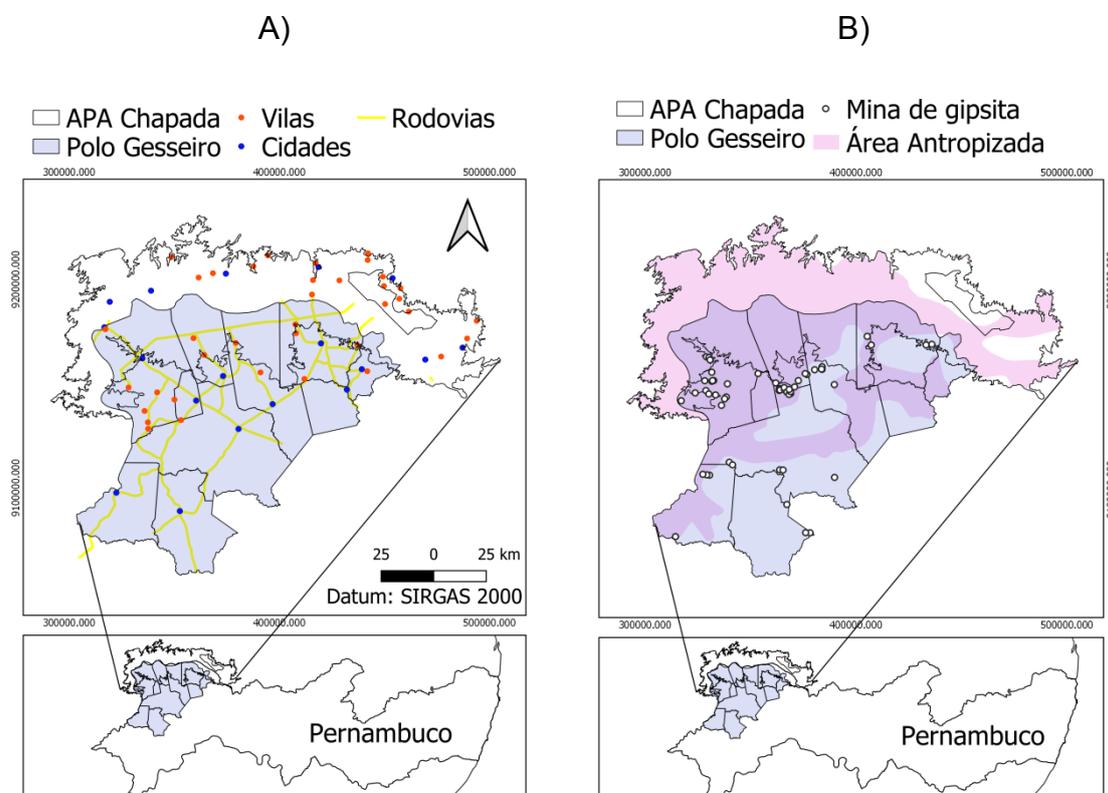
A vegetação da Chapada do Araripe é classificada, conforme o Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012), como Savana estépica (Carrasco), Savana (Cerrado) e Floresta Estacional Sempre-Verde (Floresta úmida).

O estudo de Cunha et al. (2020) indicou que em 2010 a vegetação mais densa do tipo savana e floresta se encontravam na parte superior da área de estudo e a vegetação menos densa do tipo savana estépica no centro e sul da região, as atividades agropecuárias na época localizavam-se principalmente na parte norte e fragmentada no centro e no sul, o solo exposto não foi bem identificado pelos autores.

Segundo o INSA (2014), as rodovias federais se distribuem pela unidade de conservação da APA da Chapada do Araripe (Figura 3A).

O levantamento realizado pelo IBGE (2016) demonstra a distribuição de vilas e cidades no entorno da APA e de dentro da própria APA. Como se vê na figura 3B, no entorno da APA encontra-se depósitos de gipsita, das quais a maioria é explorada de forma rudimentar (GeoSGB, 2018).

Figura 3 - Polo Gesseiro e APA Chapada do Araripe A) Presença de rodovias e vilas; B) Ocorrência de minas de gipsita e áreas antropizadas.



Fonte: INSA, 2014; IBGE, 2016; GeoSGB, 2018 (edição a autora)

Perrella (2017) e Urbano (2013) atribuem à exploração da mata nativa para a indústria do polo gesseiro ali presente como o principal fator que degrada o solo e a cobertura vegetal e expõem os municípios da região ao risco de desertificação.

Granja et al. (2017), citam a) falta de Plano de Manejo, b) descarte indevido dos resíduos; c) a falta do PGIRS (Plano de Gerenciamento Industrial de Resíduos Sólidos) nas empresas, d) o monitoramento nas minas, e) falta de recuperação das áreas degradadas e f) utilização da lenha como Matriz Energética na calcinação como fatores que permanecem impactando a chapada do Araripe.

3.4 FUSÃO DE IMAGENS

A fusão de imagens é bastante utilizada nas pesquisas de SR, e tem por objetivo fusionar bandas de diferentes sensores a fim de manter a cor e melhorar a nitidez para se realizar a interpretação visual da cena. Segundo Kpalma et al. (2014), a imagem pancromática (PAN) abrange uma única e banda espectral que abrange a faixa do visível e, em geral, uma pequena parte da faixa do infravermelho. E possui uma resolução espacial melhor que a imagem multiespectral (MS). Essa última contempla uma faixa mais estreita da resolução espectral e uma resolução espacial pior que a banda pancromática. Para estes autores, a fusão entre as bandas PAN e MS favorece a obtenção de imagens coloridas de alta resolução.

Segundo Mhangara et al. (2020), os métodos mais comumente aplicados na fusão são análise de componentes principais (PCA), transformada de Brovey (BT), Gram-Scimidt (GS) e IHS em que envolve a substituição de componentes RGB. Como observado por Johnson (2014) este tipo de fusão oferece maior resolução espacial as imagens multiespectrais, em contra partida ocorre uma perda na informação espectral, e a fusão tende a ser utilizada para fins de visualização.

Segundo Bethume et al. (1997) pesquisas de sua época já visavam desenvolver técnicas de fusão incrementando a resolução espacial e ao mesmo tempo preservando a informação espectral. Atualmente, as pesquisas também se voltaram para técnicas de fusão em composições como o índice de vegetação. Francisco e Braga (2021) fusionaram imagens multiespectrais do sensor OLI com a banda PAN do CBERS-4. Ouzemou et al. (2018) analisaram os resultados da fusão de índices de vegetação com a banda PAN.

Na pesquisa de Johnson (2014), efeitos da fusão sobre índices de vegetação com imagens Landsat-8 resultaram em perda de informação espacial na fusão multiespectral por multiplicação (transformação de Brovey, Smoothing Filter-based Intensity Modulation) e por adição (Fast Intensity-Hue-Saturation e Additive Wavelet Transform) sendo estas últimas as mais semelhantes aos dados de referência.

Mais recentemente, Bezerra (2019) comparou índices de vegetação com as bandas convencionais e bandas fusionadas 8 (μm) e 8A (μm) do MSI, obtendo resultado aproximado aos observados nos índices gerados pelo OLI. Este autor

aplicou o algoritmo LMVM que tem por finalidade realizar a fusão e manter a resolução espectral.

Segundo Manghara et al. (2020), a fusão por LMVM (local mean and variance matching) é uma técnica que aplica uma função de normalização em uma escala local dentro das imagens para igualar a média local e valores de variância da banda pancromática de alta resolução espacial com a banda multiespectral. A fusão LMVM foi considerada por estes autores como a melhor em termos de consistência espectral. A fusão LMVM é uma aplicação do Orfeo Toolbox (OTB), disponibilizado de forma gratuita.

A maioria dos autores cita em suas pesquisas a necessidade de investigar diferentes combinações de sensores e aplicação de diferentes técnicas de fusão por eles não testada para obter maior resolução espacial e manutenção da informação espectral.

3.5 SATÉLITES LANDSAT-8 E CBERS-4

O satélite LANDSAT (anteriormente chamado de *Earth Resources Technology Satellite*) foi desenvolvido pela NASA e possui as seguintes versões: LANDSAT-1 (1972), LANDSAT-2 (1975), LANDSAT-3 (1978), LANDSAT-4 (1982), LANDSAT-5 (1984), LANDSAT-7 (1999) e LANDSAT-8 (2013) (INPE, s.d.).

O LANDSAT-8 é composto pelos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). O sensor OLI possui 9 bandas, uma pancromática e as demais espectrais e as principais aplicações deste sensor são para área de recursos naturais, agricultura, queimadas, hidrologia, prospecção geológica, uso e cobertura da terra e planejamento urbano (EMBRAPA, 2020).

Segundo o INPE (2018), o CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) é o Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, nascido de uma parceria entre Brasil e China em 1999.

Com o sucesso da primeira missão, outros satélites foram lançados: da primeira geração foram lançados o CBERS-1 (1999), CBERS-2 (2003), CBERS -2b (2007), da segunda geração foram lançados o CBERS-3 (2013), CBERS-4 (2014) e CBERS-4a (2019).

O CBERS-4 é composto pelas câmeras Pancromática e Multiespectral (PAN), Multiespectral Regular (MUX), Imageador Multiespectral e Termal (IRS) e Câmera de Campo Largo (WFI). Segundo Martins e Borges (2020), apesar das câmeras PAN e MUX serem as menos utilizadas na literatura científica, elas possuem grande potencial de aplicação, capazes de identificar florestas, áreas agrícolas e áreas urbanas.

A câmera PAN é a que possui a melhor resolução espacial com a produção de uma banda pancromática com resolução de 5m e 3 bandas multiespectrais com resolução de 10m. A melhor resolução espacial e a possibilidade de fusão das imagens pancromáticas com as multiespectrais são pontos positivos para imageamentos mais detalhados (INPE, 2019).

A câmera MUX realiza o imageamento global em 26 dias com uma boa resolução espacial (20m) e graças ao campo de visada de 120km podem-se aplicar estudos de grandes áreas como municipais e regionais. As câmeras MUX e PAN são indicadas para estudo da vegetação, agricultura, meio ambiente, água, cartografia, geologia e educação (INPE, 2019).

Martins e Borges (2020) estudaram a contribuição do CBERS na literatura científica global, e verificaram que em 2005 houve aumento de publicações utilizando o satélite sino-brasileiro, onde China e Brasil são as localidades mais estudadas, em sua maioria com predomínio da escala local nas pesquisas.

As características na resolução espectral, espacial, temporal e radiométrica dos sensores PAN, MUX (CBERS-4) e OLI (LANDSAT-8) são apresentadas na Tabela 3. Por ela, é possível verificar que ao menos 3 bandas (Green, Red e NIR) de cada sensor apresentam comprimentos de onda muito próximos. Segundo Martins et al. (2018) e Mandanici e Bitelli (2016), as diferenças entre os sensores se devem a própria configuração orbital, espacial e espectral de cada satélite.

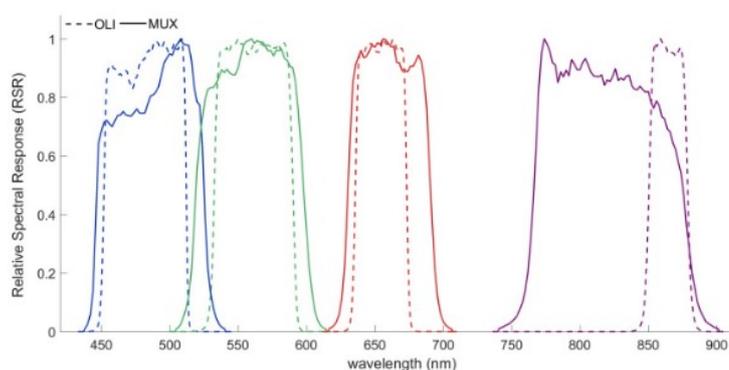
Tabela 3 - Características das câmaras PAN e MUX (CBERS-4) e do sensor OLI (LANDSAT-8)

Característica	Dados		
	CBERS-4*		LANDSAT-8*
	MUX	PAN	OLI
Desenvolvedor			
Bandas Espectrais (μm)	B05: 0,45 - 0,52 (B)	B01: 0,51 - 0,85 (Pan)	B1:0,435-0,451
	B06: 0,52 - 0,59 (G)	B02: 0,52 - 0,59 (G)	B2:0,452-0,512 (B)
	B07: 0,63 - 0,69 (R)	B03: 0,63 - 0,69 (R)	B3:0,533-0,590 (G)
			B4:0,636-0,673 (R)
			B5:0,851-0,879 (NIR)
			B6:1,566-1,651 (MIR)
			B7:2,107-2,94 (MIR)
			B8:0,503-0,676 PAN
			B9:1,363-1,384 CIRRUS
Largura da Faixa Imageada	120 km	60 km	190 Km
Taxa de Dados	68 Mbit/s	140 Mbit/s	384 Mbits/s
-----Resolução-----			
Espacial	20 m	5 m / 10 m	30 m / 15 m
Temporal	26 dias	5 dias	16 dias
Radiométrica	8 bits	8 bits	12 bits

Fonte: INPE, 2019; **USGS, 2019

Como algumas bandas dos sensores PAN, MUX e OLI são próximas (Figura 4), há a possibilidade de uma correspondência entre estes sensores após aplicação de um fator de ajuste entre eles (MARTINS et al., 2018; PINTO et al., 2016b).

Figura 4 - Resposta espectral relativa do sensor MUX (CBERS-4) e OLI (LANDSAT-8).



Fonte: Martins et al., 2018.

Em estudos realizados com a combinação destes sensores, Marujo et al. (2017) verificaram que houve boa correlação entre o NDVI gerado pelas imagens da câmera MUX e do sensor OLI, com maior correlação para as bandas do vermelho e infravermelho próximo. Reiz et al. (2020) compararam imagens dos sensores PAN e OLI para extração de feições e verificaram bons resultados para ambas as bandas, com melhor desempenho para o sensor PAN.

Neves e Mucida (2020) compararam imagens do CBERS-4, LANDSAT-8 e RAPIDEYE-3A de uma região do Cerrado e constataram que o NDVI do CBERS-4 apresentou valores mais próximos ao satélite Rapideye.

3.6 TRANSFORMAÇÃO DE ND PARA REFLECTÂNCIA

As imagens obtidas por sensoriamento remoto necessitam de correção atmosférica para eliminar o efeito atmosférico sobre a imagem. Este procedimento proporciona ajuda na discriminação de alvos e reduz o efeito topográfico (Francisco et al., 2020).

As imagens CBERS-4 são disponibilizadas em números digitais (ND), segundo Nascimento et al. (2020), o ND expressa a intensidade de cada pixel e possui uma relação direta com a radiância e a reflectância. Como cada sensor possui uma calibração diferente é necessário realizar a conversão do ND. A conversão ocorre em duas etapas: conversão dos ND em valores de radiância e a conversão das radiâncias em reflectância de superfície por correção atmosférica.

O satélite CBERS-4 não possui dados de calibração e transformação de ND em reflectância disponibilizados nos metadados, como ocorre com o LANDSAT-8. A calibração das imagens pode ser realizada por diferentes meios, dentre eles, destacamos: aplicação de métodos alternativos (PEREIRA et al., 2017; LISBOA et al., 2018) ou obtenção e divulgação dos dados de calibração (PINTO et al., 2016a; PONZONI e EPIPHANIO, 2012) (Tabela 4).

Tabela 4 - Coeficientes de Calibração e irradiância espectral no topo da atmosfera para o CBERS-4 MUX, PAN, WFI e IRS.

Bandas	Faixa espectral (μm)	R _{mín} ¹ (W/(m ² .sr. μm)) ¹	R _{máx} ¹	ESUN ² (W/m ² . μm)	G ²
MUX					
5	0,45 - 0,52 μm	35,3	344,4	1958 \pm 35	1,68 \pm 0,05B
6	0,52 - 0,59 μm	25,7	361,8	1852 \pm 29	1,62 \pm 0,05G
7	0,63 - 0,69 μm	12,9	352,3	1559 \pm 18	1,59 \pm 0,05R
8	0,77 - 0,89 μm	8,9	275,0	1091 \pm 11	1,42 \pm 0,05NIR
PAN					
1	0,51-0,85	18	227		
2	0,52-0,59	38	399		
3	0,63-0,69	27	328		
4	0,77-0,89	16	251		
WFI					
B	0,45-0,52	35,3B13	343,4	1952 \pm 35	0,379 \pm 0,011B
G	0,52-0,59	25,7B14	361,2	1852 \pm 29	0,498 \pm 0,014G
R	0,63-0,69	12,9B15	306,9	1545 \pm 18	0,360 \pm 0,011R
NIR	0,77-0,89	8,9B16	243,4	1098 \pm 11	0,351 \pm 0,011NIR
IRS					
9	0,50-0,90	20	233		
10	1,55-1,75	4,2	44,5		
11	2,08-2,35	1,8	18,5		
12	10,4-12,5	-	-		

Fonte: Pinto et al., 2016a; Ponzoni e Epiphonio, 2012; R_{min} = radiância mínima; R_{max} = radiância máxima; ¹ Obtidas em Ponzoni e Epiphonio (2012) para CBERS-3 e 4; ESUN λ = Irradiância espectral solar estratosférica; ² Radiometric calibration coefficient G (coefficient gain), Obtida em Pinto et al. (2016) para CBERS-4

Nascimento et al. (2020) apresentaram o método para conversão do ND para radiância e reflectância para as imagens do CBERS-4 utilizando os dados da Tabela 4.

A transformação de ND em radiância para as câmaras MUX utilizada por é obtida de acordo com Pinto et al. (2016a):

$$L\lambda = \frac{R_{max} - R_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} (ND - ND_{min}) + R_{min} \quad (1)$$

Onde:

ND é o Número digital de cada pixel;

R_{máx} e R_{mín} são constantes de calibração de um determinado sensor (neste caso obtidos da Tabela 4);

DN_{máx} é o número digital máximo (para cbers-4 = 255)

DN_{mín} é o número digital mínimo (para cbers-4 = 0)

$L\lambda$ é a radiância espectral monocromática ($W/m^2.sr.\mu m$);

Segundo Pinto et al. (2016a), os dados de radiância da imagem podem então ser convertidos em dados de reflectância TOA planetários usando a equação de conversão:

$$\rho\lambda = \frac{\pi \times L\lambda \times d^2}{ESUN\lambda \times \cos\theta_z} \quad (2)$$

Onde:

d é o inverso do quadrado da distância relativa TerraSol em unidades astronômicas;
 z é o ângulo solar zenital (graus) no momento da aquisição da imagem (obtido nos metadados imagem);

$ESUN\lambda$ é a irradiância solar média no topo da atmosfera ($mW/cm^2.\Omega.\mu m$) (obtida da Tabela 4 para o caso específico do CBERS-4).

O valor de “ d ” é obtido através da equação abaixo conforme Nascimento et al. (2020):

$$d = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{DSA \times 2\pi}{365}\right) \quad (3)$$

onde

DAS é o Dia Sequencial do Ano correspondente à data de aquisição das imagens

No caso das imagens do LANDSAT-8, os coeficientes de calibração acompanham as imagens e a conversão pode ser realizada na calculadora raster ou de forma automática, como pelo *plugin semiautomatic classification* do pacote SCP.

3.7 ÍNDICES NDVI, NDWI, NDBI E O ALBEDO

Segundo Valencia (2020), a vegetação apresenta a maior diferença na reflexão nos comprimentos de onda do visível e do NIR, por esta razão a maioria as pesquisas investigam a resposta espectral nessas duas faixas. A combinação de diferentes bandas espectrais pode gerar índices que são de grande importância para apoiar os estudos da área ambiental.

Muitos fatores podem influenciar no comportamento do alvo devido às diferenças que existem entre os sensores, a geometria sol-sensor ou diferente hora da aquisição da cena (SANTANA et al., 2019), o que torna necessário desenvolver métodos de avaliação ajustados ao contexto da região de estudo (RASUL et al., 2018) como o proposto por Santiago et al. (2019) que utilizaram diferentes índices de vegetação e temperatura para desenvolver modelagem matemática altamente sensível a mudanças no padrão de chuva e pode ser aplicado a qualquer região do semiárido brasileiro.

Os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Built Index*) e o albedo são índices mais utilizados nas pesquisas e trabalham com a relação de diferentes bandas espectrais como a reflectância do infravermelho próximo (NIR), a banda do vermelho e o espectro de infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Segundo Kshetri (2018), o NDVI é o índice mais usado para observar a vegetação globalmente. A clorofila das plantas absorve o espectro azul (0,4 - 0,5 μm) e vermelho (0,6 - 0,7 μm) e reflete o espectro verde (0,5 - 0,6 μm), perceptível aos nossos olhos. O infravermelho próximo é invisível ao olho humano, mas é o espectro que as plantas estão mais fortemente relacionadas: quando saudável a planta apresenta alta reflectância do infravermelho próximo (NIR) e absorção do espectro vermelho (red); quando a planta está sob estresse ou morre, a reflectância do NIR decresce. Quanto maior o valor do NDVI maior é a indicação de vegetação densa.

O *Normalized Difference Built Index* (NDBI) representa as áreas de construção e o solo exposto, os quais refletem mais o espectro de infravermelho de ondas curtas (SWIR) do que NIR. O NDBI varia de -1 a 1, o negativo representa os

corpos d'água e o valor mais alto representa as áreas construídas. Para a vegetação, o valor do NDBI é baixo. Quanto mais exposto estiver o solo maior será o valor deste índice.

O *Normalized difference Water Index* (NDWI) tem por função analisar corpos d'água. O NIR e o SWIR são os espectros mais relacionados com o NDWI. A variação do valor do NDWI é de -1 a 1. Para corpos d'água o valor é maior que 0,5 e a vegetação fica na faixa de 0 a 0,2. Valores negativos representam outros elementos como solo exposto e área construída.

O albedo corresponde a uma medida adimensional, variando de 0 a 1 e representa a fração de energia incidente que é refletida pela superfície e volta para a atmosfera (MAIA JÚNIOR e LOURENÇO, 2020). A obtenção do albedo passa pela obtenção do albedo planetário, transmissividade e albedo de superfície.

4 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo foram elencados trabalhos relevantes a cerca da utilização do SR e sobre o uso de múltiplos sensores nos estudos da Caatinga.

Como a preservação da cobertura da vegetação é fundamental para manter o equilíbrio do meio ambiente (SANTIAGO et al., 2019), percebe-se que nos últimos anos tem havido um aumento de publicações sobre a região da Caatinga utilizando sensores orbitais e técnicas de sensoriamento remoto que estudam a influência de fatores antrópicos (por exemplo, pecuária, urbanização, extração de recursos naturais e produção agrícola) e naturais (por exemplo, clima semiárido) sobre a região (GANEM et al., 2020). Segundo estes autores, as publicações mais recentes apontam maior ocorrência de estudos do tipo espaço-temporal, com utilização dos índices espectrais que relacionam a banda do vermelho e o infravermelho próximo. O MapBiomas também se destacou nas pesquisas por sua acurácia nos mapeamentos da Caatinga.

Por exemplo, o uso de imagens orbitais Landsat-8 e índices espectrais permitiu verificar modificações na paisagem da Área de Proteção Ambiental (APA) da chapada do Araripe (OLIVEIRA et al., 2017), na região do baixo São Francisco (SANTOS et al., 2020), na região do Araripe (SANTIGO et al., 2019) e no Perímetro Irrigado de Nilo Coelho (RAMOS et al., 2019) em que a ação antrópica de agricultura e pecuária fragmentou a vegetação local e reduziu os recursos hídricos.

A ação de fatores naturais, como a seca que é característica da Caatinga por localizar-se em região semiárida, foi estudada por Bacalhau et al. (2017) que verificaram redução da área do Açude Algodões-PE após 5 anos de seca com imagens NDVI dos anos de 2011 e 2016.

Em relação a fusão de imagens, pode-se destacar o uso de fusão com sensores de mesmo satélite (PISANI et al., 2019) ou de sensores de diferentes satélites (MANDANICE e BITELI, 2016) onde se evidenciaram os resultados e os desafios desta técnica.

Mandanice e Biteli (2016) destacaram problemas e desafios na técnica da fusão, como por exemplo as diferenças na configuração orbital, espacial,

radiométrica e espectral de cada sensor a fusionar, destacando-se que o impacto das diferenças dependerá da aplicação e das análises.

A fusão de bandas entre os sensores CBERS e o Sentinel-2 realizada na pesquisa de Pereira et al. (2017) apresentou bons resultados de mapeamento e as limitações observadas se relacionaram ao consumo de tempo empregado pelos algoritmos de fusão (*downscaling cokriging* e *wavelet*) que podem limitar o uso em áreas extensas.

No trabalho de Pisani et al. (2019), algoritmos IHS, Brovey e *Simple Mean* fusionaram imagens dos sensores multiespectrais MUX e pancromáticos PAN do satélite CBERS-4. Os autores concluíram que método Brovey apresentou melhores resultados em uma análise quantitativa enquanto o IHS apresentou melhores resultados na análise qualitativa das imagens. Os mesmos salientaram que o objetivo poderá definir qual a melhor técnica a empregar.

A Tabela 5 a seguir ordenaram estudos recentes em SR para os temas Caatinga, integração multiespectral, índices de vegetação e o uso de múltiplos sensores, utilizando os satélites CBERS e LANDSAT e os principais resultados.

Tabela 5 - Pesquisas em sensoriamento remoto nos últimos anos para os satélites CBERS-4 e LANDSAT-8

Revista (qualis)*	Ano, Autores	Título	Sensor	Método	Resultados
Modeling Earth Systems and Environment (B3)	Santiago et al. (2019)	Mathematical modeling and use of orbital products in the environmental degradation of the Araripe Forest in the Brazilian Northeast	LANDSAT-8 OLI	LST, NDWI, SAVI, NDVI	O modelo matemático obteve excelentes resultados para avaliar a degradação ambiental na área de preservação e o modelo pode ser aplicado a qualquer região semiárida sensível a variação pluviométrica
Revista Brasileira de Cartografia (B2)	Ganen et al. (2020)	Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra – Oportunidades e Desafios	Revisão	Revisão bibliográfica	O Mapbiomas é o projeto que mais se destaca para mapeamento, porém ainda há muito que ser investigada da vegetação da Caatinga
Revista Geoma (B1)	Oliveira et al. (2017)	Energy balance in areas with different land uses in the chapada do Araripe	LANDSAT-8 OLI	Soil heat flux (G), NDVI	Os índices utilizados indicaram processos de desmatamento pela exploração agrícola que o planalto vem sofrendo ao longo dos anos
Journal of Environmental Analysis and Progress (B1)	Bacalhau et al. (2017)	Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: Açude Algodões no Sertão pernambucano	LANDSAT-8 OLI, Rapideye	NDVI	Comparativo quali-quantitativo dos dois sensores para a vegetação da região
Environmental and Sustainability Indicators (-)	Santos et al. (2020)	Causes and consequences of seasonal changes in the water flow of the São Francisco river in the semiarid of Brazil	LANDSAT-8 OLI	NDVI, NDWI, índices de vulnerabilidade	A agropecuária é a principal responsável pela elevada vulnerabilidade de terras da área de estudo
International Journal of	Pereira et al. (2017)	Image fusion of Sentinel-2 and CBERS-4 satellites for	Sentinel-2, CBERS-4	Wavelet e downscaling	A banda pancromática CBERS-4 pode ser aplicada para o refinamento da

Image and Data Fusion (A2) RICA (B1)		mapping soil cover in the Wetlands of Pantanal		cokriging	resolução espacial de imagens multiespectrais (MS) Sentinel-2
	Sokoloski et al. (2019)	Estudo da vulnerabilidade natural da sub-bacia do Rio Piracicaba/MG utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	CBERS-4 MUX	Estudo da Vulnerabilidade	O alto curso do rio Piracicaba é o trecho com maior vulnerabilidade
Comunicata Scientiae (B2)	Ramos et al. (2019)	Mapping of the current land use in part of the Irrigated Perimeter Nilo Coelho, Petrolina-PE, Brazil	LANDSAT-8 OLI	Classificação supervisionada por pixel	Classificação não supervisionada foi de grande utilidade e apresentou elevada sensibilidade para distinguir objetos
Remote Sensing (A2)	Cunha et al. (2020)	Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: Evidence from the Brazilian Caatinga	³ LANDSAT TM ⁴ LANDSAT EMT+ LANDSAT-8 OLI	Albedo, EVI, NDVI	Albedo de superfície apresentou o melhor desempenho que o índice de vegetação e NDVI para identificar área desmatada
Remote sensing (A2)	Mandanici e Bitelli (2020)	Preliminary Comparison of Sentinel-2 and LANDSAT 8 Imagery for a Combined Use	LANDSAT-8 OLI	NDVI, NDWI e FII	Ambos os sensores apresentam boa correlação entre si para a maioria das bandas
Caderno de Geografia (B5)	Pisani et al. (2019)	Avaliação de técnicas de fusão de imagens orbitais utilizando produtos do satélite CBERS 4 para a APA do Rio Machado-MG	CBERS MUX e PAN	Fusão IHS, Brovey e Simple Mean	O método Brovey e IHS foi mais satisfatório no ponto de vista quantitativo e qualitativo
R. bras. Geomática	Francisco e Braga (2021)	Fusão de imagens multissensor para a identificação de feições			

Revista Bras. de Geo. Física (B4)	Galvíncio et al. (2016)	erosivas no município de Bauru/SP. Avaliação do estágio de regeneração do bioma Caatinga na microrregião do Araripe, com sensoriamento remoto	LANDSAT-5	NDVI	O NDVI foi bastante influenciado pela intensidade de chuva
Revista Espinhaço (B5)	Neves e Mucida (2020)	Comparação de índices de vegetação entre imagens CBERS, LANDSAT e Rapideye para área do Cerrado Brasileiro	¹ LANDSAT-8 OLI ¹ CBERS-4 MUX	NDVI, SAVI	Houve semelhança no NDVI de CBERS-4 e RapidEye; SAVI foi insatisfatório para os 3 satélites

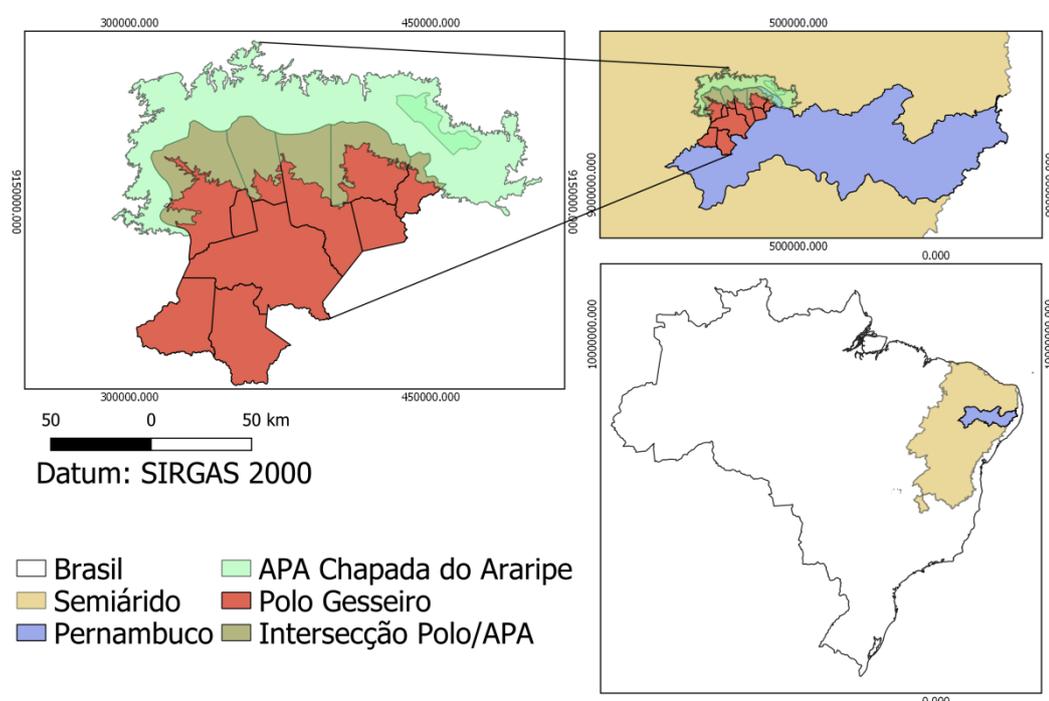
* Qualis 2017-2020 ¹ Resolução espacial, radiométrica e espectral ver tabela 3; ² Resolução espacial: 90m; Radiométrica: 12bits; ³ Resolução espacial: 30m; Radiométrica: 8bits; 4 Resolução espacial: 30m; Radiométrica: 8bits.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido em duas áreas na Mesorregião Sertão Pernambucano: o Polo Gesseiro do Araripe e a Área de Proteção Ambiental (APA) da Chapada (Figura 5). As áreas foram escolhidas por apresentarem relevância econômica e ambiental.

Figura 5 - Polo Gesseiro e APA chapada do Araripe



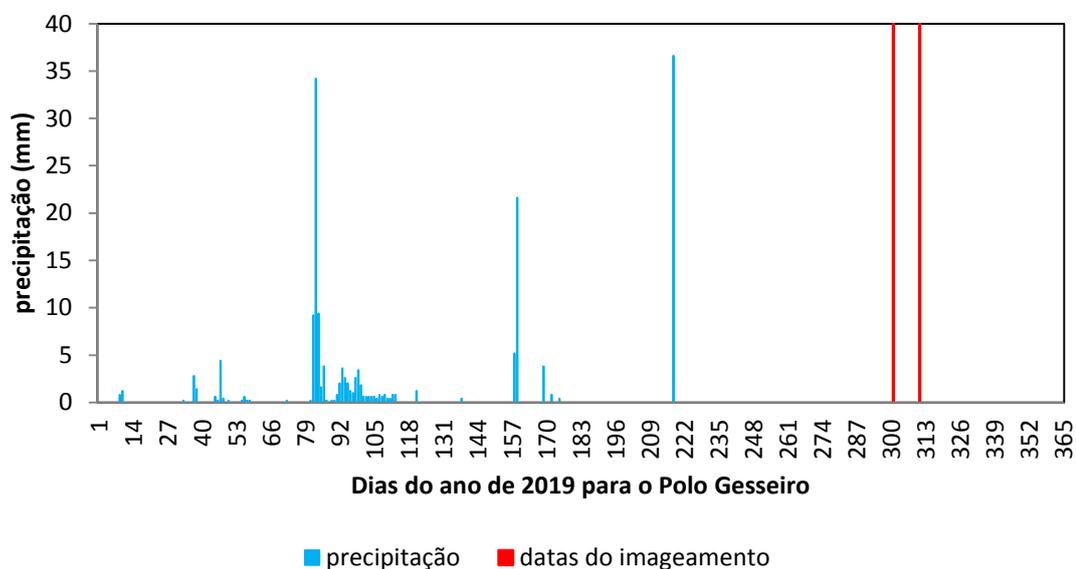
Fonte: Shapefiles: AESA; montagem: a autora

O clima da região é tropical zona equatorial, semiárido com 7 a 8 meses seco e quente, com temperatura acima de 18° C durante o ano. O bioma da região é a Caatinga. A vegetação em altitudes entre 600 e 750 m nesta região, localizam-se áreas de transição (ecótono ecológico) (SANTOS et al. 2020a).

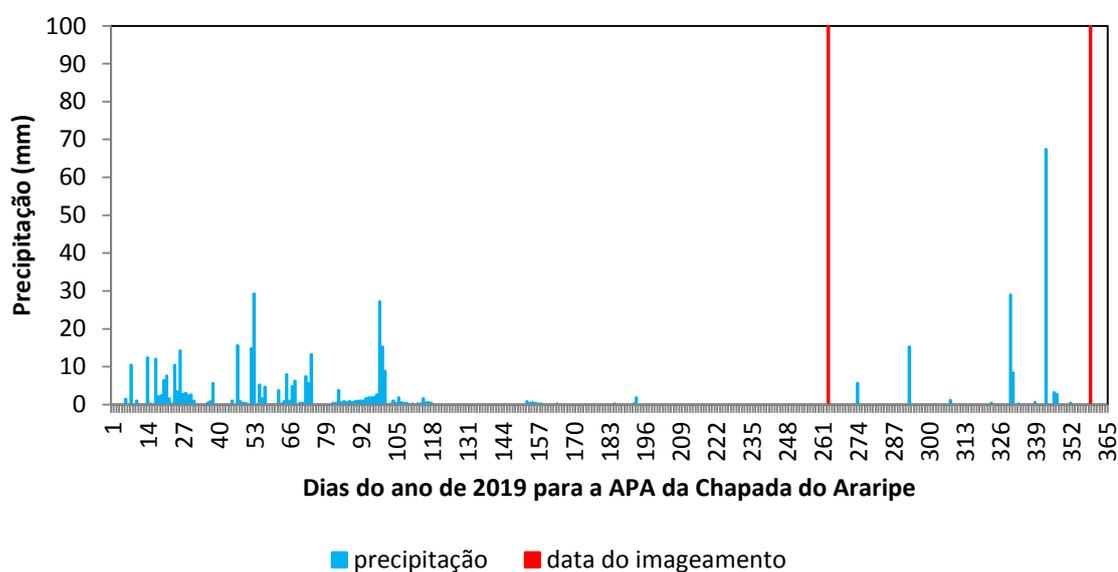
As precipitações mensais médias para o ano de 2019 para as regiões da APA e do Polo Gesseiro foram obtidas das estações de Crateus, Campos Sales, Barbalha e Ouricuri, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Figura 6).

Figura 6 - Precipitação de 2019 para A) Polo Gesseiro (estação Ouricuri); B) APA da Chapada do Araripe (estações Ouricuri, Campos Sales, Barbalha, Crateus)

A)



B)



5.2 IMAGENS DE SR DA ÁREA DE ESTUDO

As imagens utilizadas para a pesquisa foram adquiridas da câmera MUX e PAN do CBERS-4 (inpe.br) e do sensor OLI do Landsat-8 (glovis.usgs.gov).

Como as áreas do Polo Gesseiro e APA da Chapada do Araripe são duas áreas interligadas de grande extensão e considerando a passagem dos satélites, a cobertura de nuvens, e as datas disponíveis no momento do imageamento dos sensores orbitais optou-se por estudar as duas áreas separadamente, conforme a Tabela 6. A APA da Chapada do Araripe foi estudada apenas com sensor OLI pois a área é completamente imageada por este sensor, sem necessidade de mosaicos, a área foi estudada em diferentes épocas. Já o Polo gesseiro foi estudado com dois satélites diferentes, Landsat-8 e CBERS-4.

Tabela 6 - Imagens CBERS-4 e Landsat-8 obtidas para a Área de estudo

Área imageada	Sens	Data	Comparação	Índices
APA Chapada do Araripe	OLI ¹	LC08_L1TP_217065_20190920_20190819_01_T1	Entre épocas	NDVI
	OLI	LC08_L1TP_217065_20191225_20200110_01_T1		NDWI
Polo Gesseiro	PAN	CBERS_4_PAN5M_20191028_152_108_L4	Entre sensores	NDBI
	MUX ²	CBERS_4_MUX_20191028_152_109_L4		Albedo
	OLI	LC08_L1TP_217066_20190718_20190731_01_T1		NDVI
				NDWI
				NDVIfusão

¹ Obtidas pelo site glovis; ² Obtidas pelo site INPE

Em virtude da pandemia do coronavírus que se abateu mundialmente em 2020 e perdura em 2021, houve a imposição do isolamento social como medida de combate a disseminação do vírus. Por esta razão, visitas de campo a área de estudo foram desaconselhadas devido ao risco de contaminação. Esta dificuldade foi amenizada com o uso da coleção do MapBiomias que pode ser usada como auxiliar para comparação, como realizado por Andrade, et al. (2019). O projeto MapBiomias realiza o levantamento da cobertura do solo brasileiro, atualizado anualmente (NEVES e MUCIDA, 2020).

5.3 PRE-PROCESSAMENTO

As imagens do satélite CBERS-4 e Landsat-8 foram pré-processadas no QGIS 3.10 Coruña, onde se realizaram a reprojeção das bandas para SIRGAS 2000/24S. Para o CBERS-4, a correção atmosférica e conversão de número digital

(ND) para reflectância foi realizada conforme a metodologia de Nascimento (2020) com os coeficientes de calibração disponibilizados por Pinto et al., 2016^a; Ponzoni e Epiphanyo, 2012. Para o Landsat-8, a correção atmosférica e conversão para reflectância foi realizada conforme metodologia da USGS (2019) e os parâmetros utilizados para esta correção são os disponibilizados anexos às imagens. As áreas de interesse para o estudo do Polo Gesseiro e da APA da Chapada do Araripe foram delimitadas com uma camada vetorial para cada região.

5.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Os índices espectrais foram gerados a partir do processamento das imagens dos satélites CBERS-4 e Landsat-8.

Para o Polo Gesseiro foram gerados os índices NDVI e NDWI dos sensores MUX e OLI e um segundo NDVI com resolução espacial melhorada através da técnica de fusão LMVM com o sensor MUX e PAN. O Polo Gesseiro foi analisado apenas em uma época classificada como seca. Desta forma, foram gerados 5 índices para o estudo do Polo Gesseiro: $NDVI_{MUX}$ e $NDWI_{MUX}$, $NDVI_{FUSÃO}$, $NDVI_{OLI}$ e $NDWI_{OLI}$.

Para a APA da Chapada do Araripe foram gerados os índices NDVI, NDWI, NDBI e albedo do sensor OLI em duas épocas, imagem de setembro foi considerada como seca e imagem de dezembro considerada como chuvosa. A definição da época seca e chuvosa foi definida conforme a ocorrência de precipitação nos três meses anteriores a obtenção da imagem (Figura 6A e B). Desta forma, foram gerados 8 índices para estudar a APA da Chapada do Araripe: NDVI, NDWI, NDBI e ALBEDO para o mês de setembro e NDVI, NDWI, NDBI e ALBEDO para o mês de dezembro.

O NDWI foi obtido conforme equação proposta proposto por McFeeters (1996) que é a relação entre as bandas do verde (GREEN) e o NIR:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (4)$$

O *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) representa as áreas de construção e o solo exposto, os quais refletem mais o espectro de infravermelho de ondas curtas (SWIR) do que NIR. A equação que define o NDBI é:

$$\text{NDBI} = \frac{\text{SWIR} - \text{NIR}}{\text{SWIR} + \text{NIR}} \quad (5)$$

O albedo corresponde a uma medida adimensional, variando de 0 a 1 e representa a fração de energia incidente que é refletida pela superfície e volta para a atmosfera (MAIA JÚNIOR e LOURENÇO, 2020). A obtenção do albedo passa pela obtenção do albedo planetário, transmissividade e albedo de superfície.

O albedo planetário é obtido por (SHUAI et al., 2014):

$$\alpha_{TOA} = \sum(\omega\lambda \times \rho\lambda) \quad (6)$$

Onde:

α_{TOA} = albedo planetário do topo da atmosfera

$\omega\lambda$ é o coeficiente de cada banda

$\rho\lambda$ é a refletância de cada banda

O coeficiente $\omega\lambda$ é calculado pela equação:

$$\omega\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum_1^n ESUN_\lambda} \quad (7)$$

Onde:

$ESUN_\lambda$ é a intensidade da irradiância solar na superfície

A correção atmosférica do albedo segundo Bastianssen (2000) é obtida segundo:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} \times \alpha_p}{t_{SW}^2} \quad (8)$$

Onde:

α é o albedo de superfície;

α_{toa} é o albedo planetário;

α_p é a radiação solar refletida pela atmosfera (0,03);

t_{sw} é a transmissividade atmosférica para os dias de céu claro.

A transmitância proposta por Bastianssem (2000) é obtida por:

$$t_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (9)$$

Onde:

Z é a altitude de cada pixel

O NDVI foi obtido pela relação proposta por Rouse et al. (1973), que é a relação das bandas do infravermelho próximo (NIR) e a banda do vermelho (RED):

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (10)$$

Para obter o NDVI fusionado, metodologia proposta por Bezerra (2019), aplicou-se a correção geométrica entre as bandas B8 e a B1 do CBERS-4. Em seguida, a banda multiespectral B8 (20m) foi redimensionada para as medidas da banda pancromática B1 (5m) com a função superimpose da aplicação Orfeo Toolbox (OTB). Em seguida foi aplicada a função Pansharpening LMVM (Local Mean and Variance Matching) do OTB para fusionar B8 e B1. Por fim, o NDVI com a banda fusionada foi calculado pela equação proposta por Bezerra (2019):

$$NDVI_{FUSÃO} = \frac{NIR_{fusionado} - red}{NIR_{fusionado} + red} \quad (11)$$

5.5 ANÁLISES

Os índices gerados para o Polo Gesseiro e para a APA da Chapada do Araripe foram analisados visualmente e estatisticamente por meio da matriz de correlação obtida da função r.covar do software QGIS 3.10 e seus valores foram comparados com a literatura científica.

Para o Polo Gesseiro, valores dos índices NDVI foram comparados aos de Chagas et al. (2008), que estudou dinâmica espectral da vegetação de caatinga em Arcoverde, Pernambuco (Tabela 7).

Tabela 7 - NDVI de Arcoverde, PE

Classe	NDVI
Água	<-0,1
Solo exposto	0,01-0,1
Vegetação rala	0,1-0,2
Vegetação esparsa	0,2-0,4
Vegetação de transição	0,4-0,6
Vegetação densa	>0,6

Fonte: Chagas et al., 2008

Posteriormente, para comparar a resposta espectral multifonte dos índices físicos, foram extraídos polígonos SHAPEFILE amostrais conforme a Tabela 8 para cada região. Utilizou-se a coleção do Mapbiomas v5 para identificar as feições de interesse para extração de amostras. A unidade amostral foi estabelecida em um polígono shapefile de 90x90 m. Foi utilizada a média dos pixels para representar o valor de cada polígono para análises estatísticas descritiva (média) e box-plot.

Tabela 8 - Extração de polígonos na região

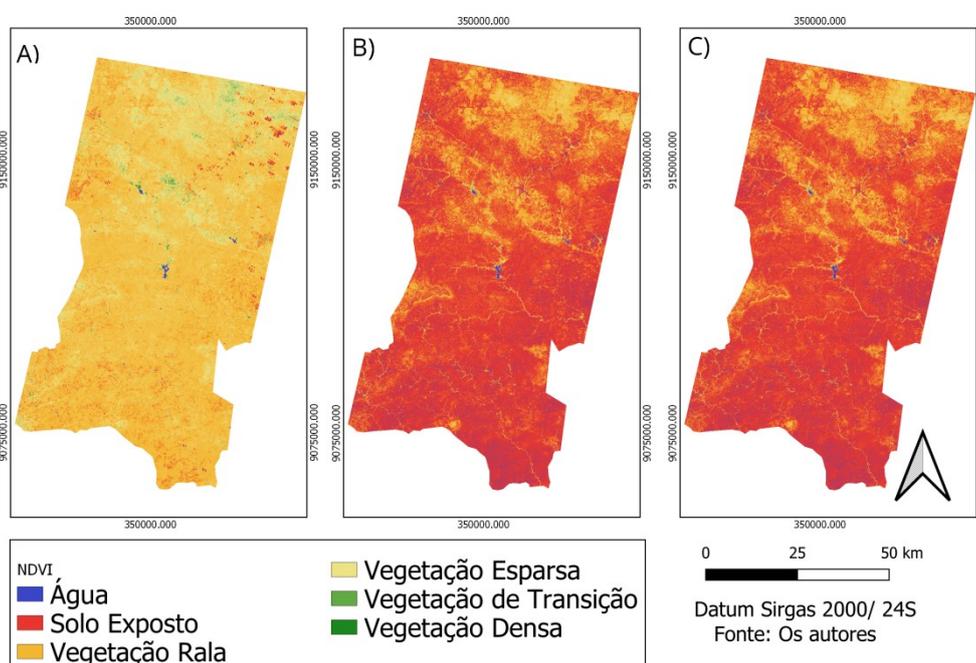
Feição	Polígonos por feição
Polo Gesseiro	
Rio, Lago e Oceano	20
Infraestrutura Urbana	47
Pastagem	50
Formação Savânica	60
APA Chapada do Araripe	
Vegetação Florestal	47
Vegetação Savânica	48
Pastagem	50
Lavoura	50

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 POLO GESSEIRO

Os resultados dos índices $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{OLI}$, $NDVI_{FUSÃO}$ e os respectivos histogramas são apresentados na Figura 7 e 8. A análise visual dos índices permitiu verificar diferença na tonalidade das imagens de $NDVI_{OLI}$ em relação as imagens do $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ e nenhuma diferença visual entre $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$. A principal razão para esta diferença visual se deve as diferenças existentes entre as características espectrais dos sensores dos CBERS-4 e LANDSAT-8, como descrito no Capítulo 3.5. Como pode ser visto na Figura 4, as bandas utilizadas para gerar os índices NDVI e NDWI possuem os comprimentos de onda RED e GREEN semelhantes entre os satélites CBERS-4 e LANDSAT-8 enquanto o comprimento de onda do NIR é diferente.

Figura 7 – Polo Gesseiro: A) $NDVI_{OLI}$; B) $NDVI_{MUX}$; C) $NDVI_{FUSÃO}$



Os valores mais altos de NDVI observados em cada sensor se referem a vegetação mais saudável e quanto maior o valor do índice, maior teor de clorofila. Os resultados dos $NDVI_{MUX}$, $NDVI_{OLI}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ corroboram Ponzoni, Shimabukuro

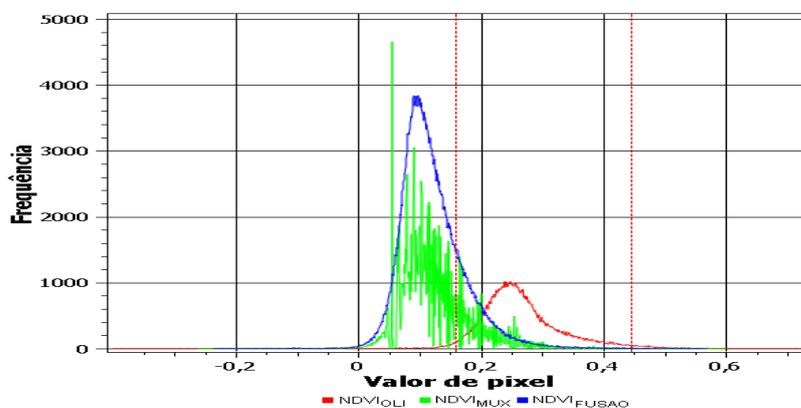
e Kuplich (2012) em que valores negativos correspondem a água e valores positivos, próximos ao valor máximo 1, correspondem a vegetação com maior vigor vegetativo, que podem ser observados na parte superior de cada índice (Figura 7).

Pela classificação de Chagas et al. (2008), o índice $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ e $NDVI_{OLI}$ variam entre solo exposto (0,01-0,1), vegetação rala (0,1-0,2) e esparsa (0,2-0,4). Apesar da diferença de tonalidade, os resultados do NDVI para todos os sensores são baixos e compatíveis com o período de baixa pluviosidade daquela região corroborando o mesmo comportamento observado por Bilar et al. (2018).

Segundo Damasceno (2020) existe uma relação direta da vegetação com a precipitação, com aumento do NDVI em períodos chuvosos. Em períodos de estiagem prolongada, a vegetação diminui a atividade fotossintética e o resultado do NDVI tende para os menores valores. Barbosa et al. (2019) indicaram que apenas a vegetação da caatinga com raízes mais profundas é capaz de suportar os meses de seca, mantendo elevados os índices de NDVI.

O histograma (Figura 8) mostrou a mesma diferença entre $NDVI_{OLI}$ e os $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$. Outros autores observaram diferenças no NDVI gerado pelo Landsat-8 e o CBERS-4. Hermann et al. (2019) observaram que a mata de araucária variou de 0,2 a 0,6 para o NDVI gerado pelo sensor OLI, já o NDVI gerado pelo sensor MUX apresentou variação de 0,0 a 0,4. Valencia (2020) verificou valores mais altos para o NDVI gerado pelo sensor OLI e mais baixos para o NDVI gerado pelo sensor MUX. Neves e Mucida (2020) observaram maior discrepância do NDVI gerado pelo Landsat-8 e CBERS-2 para áreas de menor cobertura vegetal.

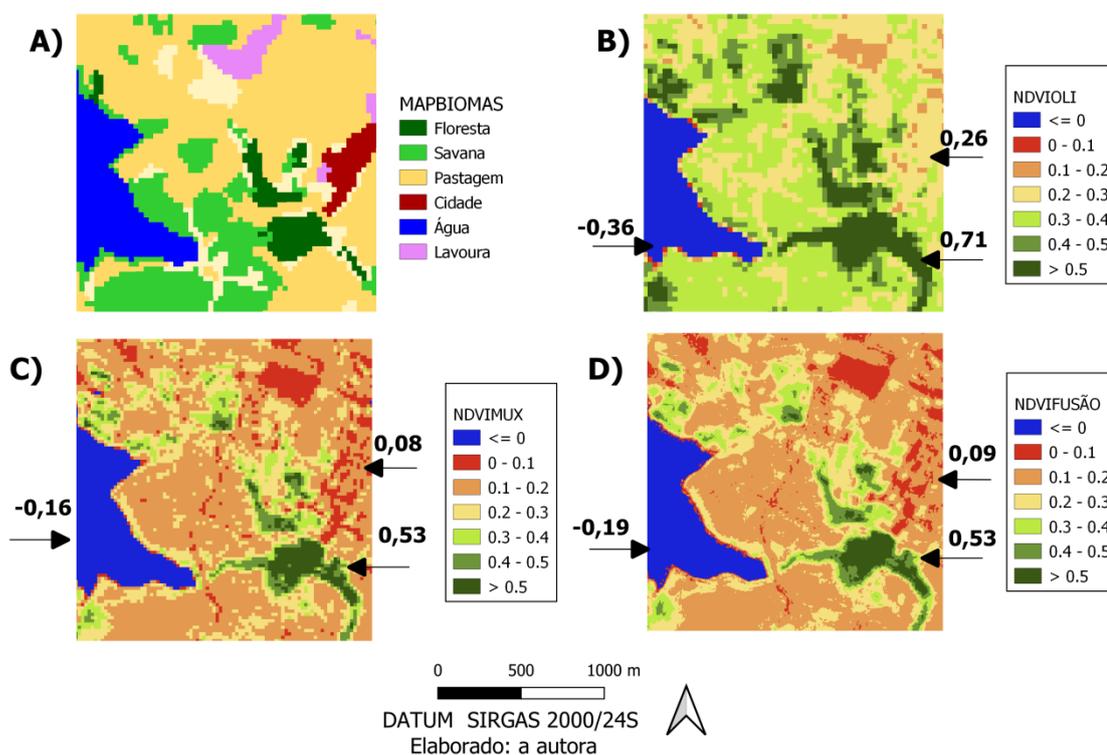
Figura 8 - Histograma do NDVI



A diferença entre $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{OLI}$ pode estar relacionada a antropização das áreas (NEVES e MUCIDA, 2020), e também relacionada a diferença na resolução radiométrica e espectral (HERMANN et al., 2019), em que se observa no Landsat-8 resolução de 16 bits e a banda do NIR de 0,851-0,879 μm (Tabela 3), enquanto o CBERS-4 possui 8 bits e a banda do NIR de 0,77-0,89 μm .

A Figura 9 apresenta o recorte da região de estudo, no Açude São Pedro em Trindade-PE, com resolução de pixel do $NDVI_{OLI}$ de 30m, do $NDVI_{MUX}$ de 20m e $NDVI_{FUSÃO}$ com resolução de 5m. Os índices de vegetação foram comparados com o mapa gerado a partir da coleção MAPBIOMAS com resolução de 30m. Pode-se verificar que houve diferença entre $NDVI_{OLI}$ e o $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$, com maior detalhamento de elementos como a cidade e os contornos do açude e da vegetação para os $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$. Observou-se pouca diferença entre $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$, destacando-se que o $NDVI_{FUSÃO}$ suavizou os contornos dos elementos.

Figura 9. Açude São Pedro, Trindade-PE A) $NDVI_{MAPBIOMAS}$; B) $NDVI_{OLI}$, C) $NDVI_{MUX}$, e D) $NDVI_{FUSÃO}$.

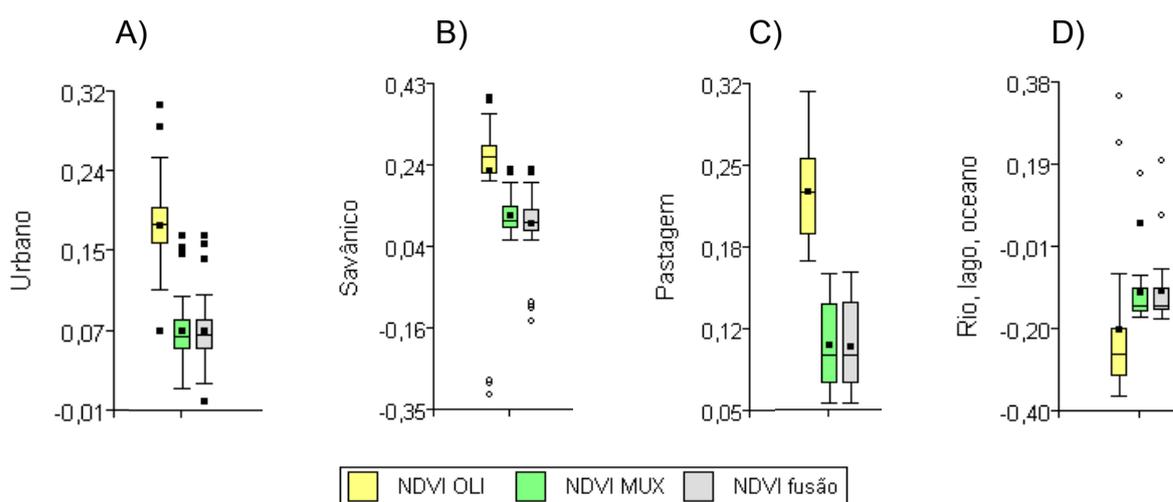


Com o auxílio da classificação do Mapbiomas (Figura 3^a), os elementos água, formação florestal e cidade podem ser identificados em todas as imagens, os quais estão destacados com setas, com o respectivo valor de índice de vegetação gerado por cada sensor. Nota-se que o $NDVI_{OLI}$ apresentou o menor valor para água e o maior valor para a floresta e cidade. As áreas classificadas como savana e pastagem na Figura 3^a não puderam ser identificadas no $NDVI_{OLI}$, $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$.

A Figura 10 apresenta o box-plot das amostras raster extraídas pelos polígonos SHAPEFILE. A linha central apresenta a mediana, as caixas representam o intervalo interquartílico e os bigodes apresentam a amplitude dos dados. O $NDVI_{OLI}$ apresentou maior media para área urbana, vegetação savânica e pastagem.

A classe Rio apresentou outliers >0 , que podem estar relacionados a amostragem próxima as margens do rio. Da mesma forma, os outliers da classe urbana podem estar relacionados a heterogeneidade espacial de uma cidade (praças, ruas, telhados, árvores). O box-plot indicou o valor do NDVI da pastagem de 0,24 para $NDVI_{OLI}$ e 0,12 para $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ e da vegetação savânica de 0,30 para $NDVI_{OLI}$ e 0,14 para $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$.

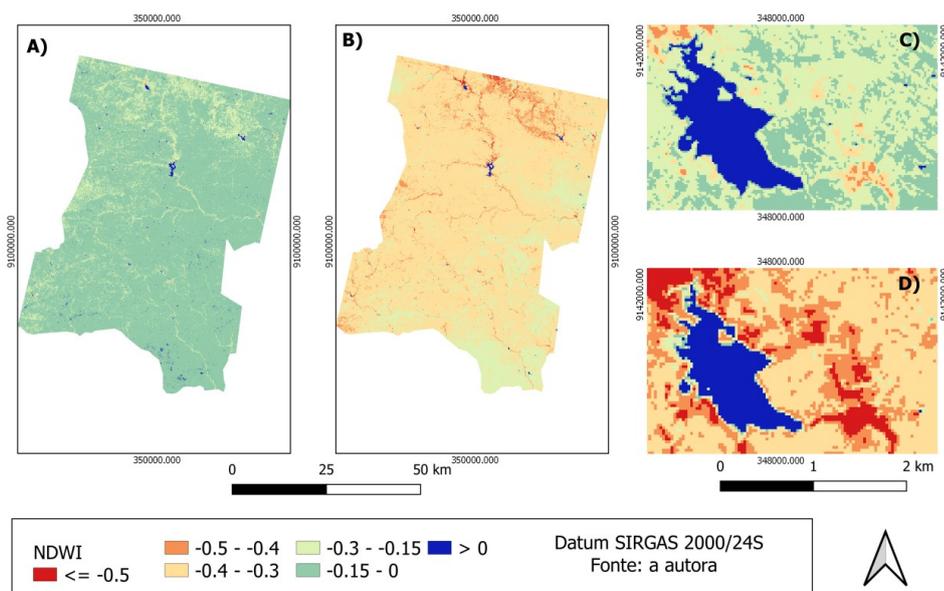
Figura 10 – Box-plot para o $NDVI_{OLI}$, $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ para as feições A) Urbano, B) Savânico; C) Pastagem; D) Rio, lago e oceano



Os resultados do índice de vegetação $NDWI_{OLI}$ e $NDWI_{MUX}$ são apresentados na Figura 11. Os corpos hídricos da região possuem pequena extensão e foram identificados com os maiores valores, corroborando McFeeters (1996) em que $NDWI$

apresenta valores positivos para água (Figuras 11C e D). Semelhante ao NDVI, a diferença na resposta espectral observada entre o NDWI do CBERS-4 e Landsat-8 está relacionada a resolução radiométrica e espectral de cada sensor.

Figura 11 – Polo Gesseiro por índice de água A) $NDWI_{OLI}$, B) $NDWI_{MUX}$; Açude São Pedro, Trindade-PE C) $NDWI_{OLI}$, D) $NDWI_{MUX}$



Para a presente pesquisa, o índice NDWI apresentou valores negativos para a maior parte da área de estudo, em ambos os sensores, variando de -0,5 a 0,2. Andrade et al. (2018) encontraram NDWI variando de -0,25 a 0,30 para a região semiárida de Exu e Moreilândia, em que os valores negativos representavam solo exposto representando a maior parte da região estudada por estes autores, enquanto valores positivos representavam a pastagem, vegetação esparsa e densa.

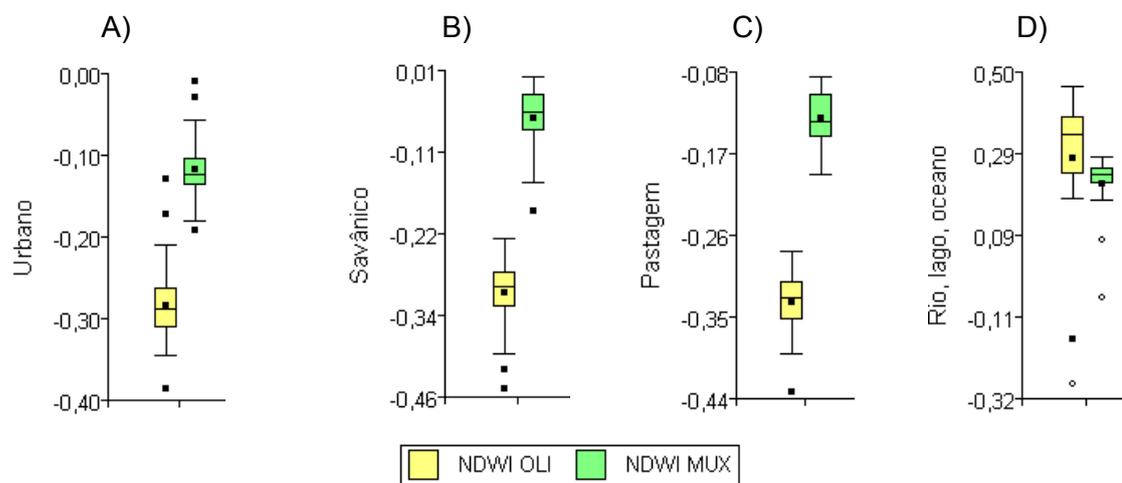
O NDWI proposto por McFeeters (1996) e adotado nesta pesquisa discriminou a classe água sobre outras classes. Ao testar os modelos de índices de água de Gao (1996) e McFeeters (1996), Szabó et al. (2016) verificaram que o modelo de McFeeters (1996) foi o melhor na discriminação do elemento água sobre outras classes presentes na imagem e destacaram a importância de estudar a capacidade de cada índice de vegetação de discriminar e realçar as classes da superfície do solo.

Campos et al. (2012) citam três diferentes NDWIs na literatura: o de Gao (1996) que relaciona as bandas NIR e MIR que acentua a umidade da vegetação, o de McFeeters (1996) que relaciona a banda G e NIR que delimita a área hídrica no terreno e o de Xu (2006) que relaciona as bandas G e MIR. Os autores encontraram melhores resultados para Gao (1996) e Xu (2006) e o pior desempenho para McFeeters (1996) no estudo do NDWI em áreas áridas e destacam que a sazonalidade ou perenidade da água e se esta encontra-se cercada ou não de vegetação também influenciam no desempenho de absorção e reflexão de cada banda.

Para o caso de região semiárida, Azevedo et al. (2018) verificaram bons resultados com NDWI proposto por McFeeters (1996), no qual verificaram que a redução observada na superfície do reservatório de sobradinho com o índice de vegetação foi compatível com os valores disponibilizados pela concessionária do reservatório.

Os box-plot do $NDWI_{OLI}$ e $NDWI_{MUX}$ indicaram diferenças mais acentuadas nos resultados entre os sensores, se comparado com o box-plot do NDVI (Figura 12). Apenas o box-plot da classe Rio, lago, oceano apresentaram semelhança entre os sensores (Figura 12D).

O box-plot da classe Savânica, Urbano e pastagem apresentaram distribuição semelhante, onde no $NDWI_{OLI}$ a variação foi de -0,40 e -0,20 e no $NDWI_{MUX}$ a variação foi de 0,01 até -0,18, o que pode indicar sobreposição de classes. Os box-plot de NDVI e NDWI de Szabó et al. (2016) também verificaram que as classes floresta, pastagem e área construída apresentavam distribuição semelhante. Estes autores justificaram que a sobreposição de classes observada em sua pesquisa ocorre porque a área urbana se encontrava em meio rural e por isto, no mesmo local, havia elementos urbanos (ruas e casas) e também naturais (jardim e pastagem).

Figura 12 – Box-plot para o $NDWI_{OLI}$, $NDWI_{MUX}$ 

Além de Szabó et al. (2016), Pereira et al. (2018) também utilizaram o NDWI de McFeeters para verificar o desempenho na discriminação de diferentes alvos da superfície terrestre. Para estes autores, o NDWI de McFeeters apresentou bom desempenho no delineamento de corpos hídricos e confusão entre outros elementos.

A Tabela 9 apresenta a estatística da camada raster, obtida pelo QGIS 3.10, avaliando todo o Polo Gesseiro, pode-se verificar menor diferença entre valores de máximo e mínimo no $NDVI_{FUSÃO}$ se comparado ao $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{OLI}$, esse comportamento pode estar relacionado a faixa espectral pancromática aplicada ao índice de vegetação. Mesmo assim, a média entre $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ foram iguais e o desvio semelhantes. O $NDVI_{OLI}$ apresentou a maior média e o maior desvio.

Tabela 9 – Estatística descritiva dos índices de vegetação

	Mínimo	Máximo	Médio	Desvio
NDVI				
MUX	-0.39	0.69	0.12	0.05
OLI	-0.58	0.83	0.27	0.07
PAN	-0.83	0.94	0.12	0.06
NDWI				
MUX	-0.53	0.44	-0.11	0.05
OLI	-0.73	0.63	-0.34	0.05

O $NDWI_{OLI}$ também apresentou média superior ao observado em $NDWI_{MUX}$. O que pode estar relacionado a diferença na faixa espectral do NIR do OLI (0,77-0,89 μ m) ser maior que o NIR do MUX (0,851-0,879).

Os índices apresentaram boa correlação entre si (Tabela 10), sendo a melhor correlação observada entre $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ e classificada como forte, e a correlação mais fraca ocorreu entre $NDVI_{OLI}$ e $NDWI_{MUX}$ segundo classificação de Devore (2006).

Tabela 10 – Correlação dos índices de vegetação para o Polo Gesseiro

	$NDVI_{OLI}$	$NDVI_{MUX}$	$NDWI_{MUX}$	$NDWI_{OLI}$	$NDVI_{FUSÃO}$
$NDVI_{OLI}$	1	0,88	-0,44	-0,83	0,87
$NDVI_{MUX}$		1	-0,65	-0,72	0,97
$NDWI_{MUX}$			1	0,68	-0,61
$NDWI_{OLI}$				1	-0,71
$NDVI_{FUSÃO}$					1

O estudo do Polo Gesseiro atendeu o objetivo de analisar a sensibilidade espectral para a cobertura do solo utilizando os sistemas sensores OLI do LANDSAT-8, MUX e PAN do CBERS-4, limitado aos índices NDVI e NDWI e apenas em uma época devido a presença de nuvens nos períodos estipulados. Da mesma forma o objetivo de analisar a resposta espectral da vegetação foi realizado apenas em uma época.

O objetivo proposto de analisar a correlação espectral para a cobertura do solo dos sensores OLI e MUX e PAN foi alcançado por meio dos índices NDVI, NDWI.

6.2 APA DA CHAPADA DO ARARIPE

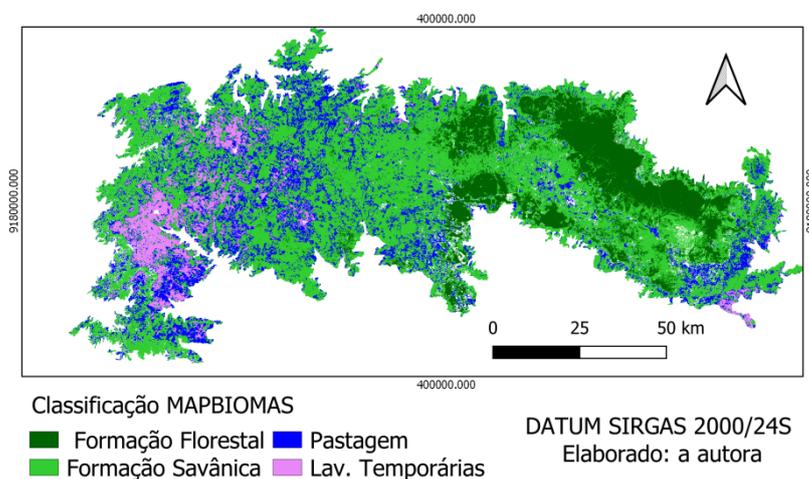
Como apresentado na revisão de literatura, no entorno da Área de Proteção Ambiental (APA) da chapada do Araripe, encontra-se o Polo Gesseiro, e segundo Alves et al. (2011), existem o interesse econômico de explorar os recursos minerais do Polo e por outro lado o interesse de proteção ambiental da APA, onde a ação antrópica de extrativismo, queimadas, desmatamentos e expansão urbana causam grande impacto na paisagem da APA, como constataram Araujo et al. (2009).

Na Figura 3, apresentada anteriormente, verifica-se a presença de rodovias federais se distribuem pela unidade de conservação da APA (INSA, 2014). O

levantamento realizado pelo IBGE (2016) demonstrou a distribuição de vilas e cidades no entorno da APA e de dentro da própria APA. Além disso, no entorno da APA encontra-se depósitos de gipsita, das quais a maioria é explorada de forma rudimentar (GEOSGB, 2018).

A classificação do MAPBIOMAS é apresentada na Figura 13, a APA da Chapada do Araripe encontra-se em sua quase totalidade classificada com vegetação de formação savânica, formação florestal, áreas de pastagem e lavoura temporárias. A vegetação florestal mais densa encontra-se localizada a leste principalmente a região que compreende o FLONA Araripe-Apodi.

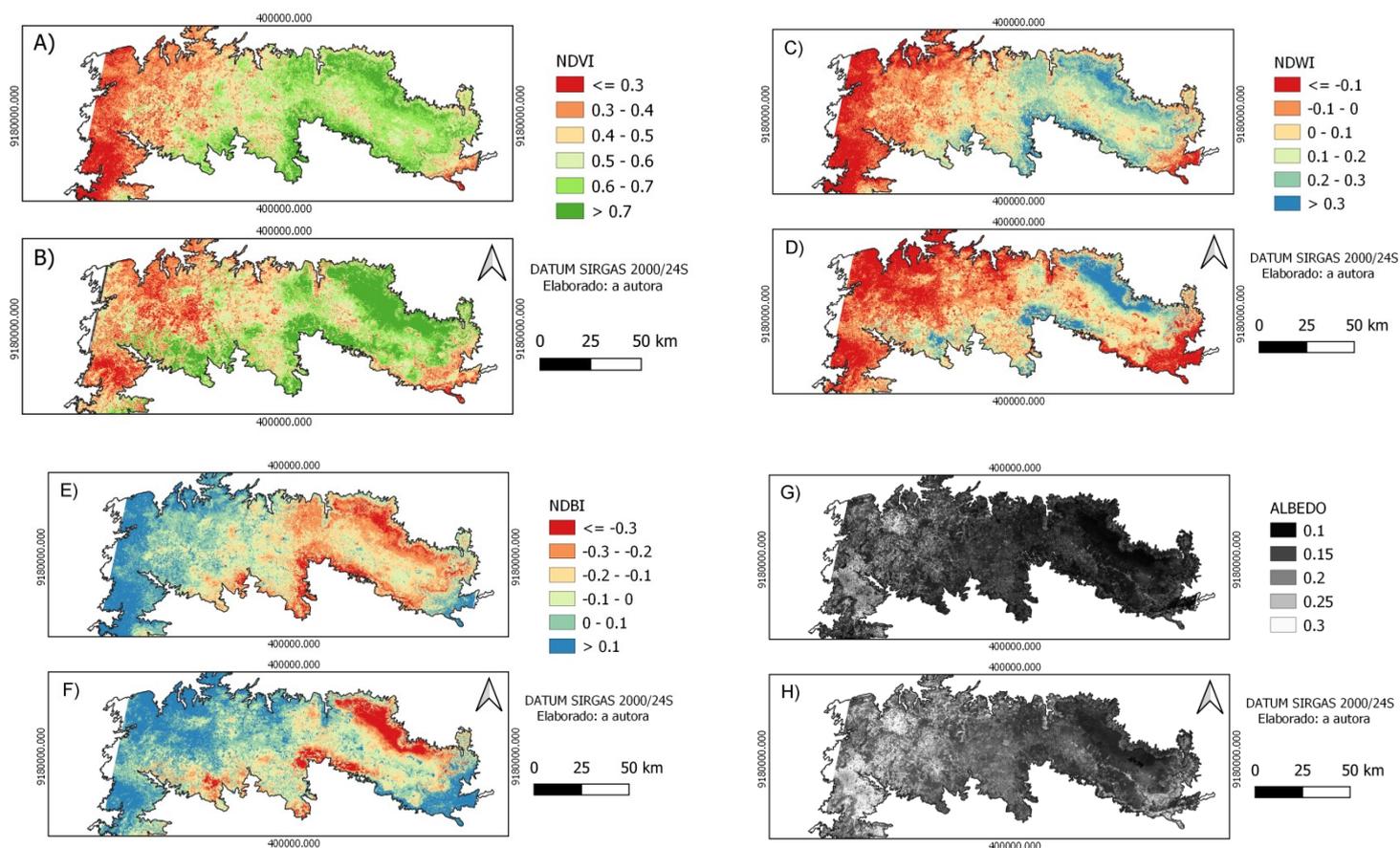
Figura 13. APA da Chapada do Araripe pela classificação MAPBIOMAS



A formação savânica da APA da Chapada se distribui por toda a região. A atividade antropica de pastagem localiza-se principalmente a oeste e se distribui de modo mais fragmentado para o sentido leste na região da APA, enquanto a lavoura temporárias localiza-se apenas a oeste da APA. Dessa forma pode-se verificar duas áreas distintas, a oeste antropizada e a leste mais preservada.

A distinção de áreas naturais e antropizadas da APA da Chapada do Araripe observada pela classificação do MPABIOMAS também foi verificada nos índices espectrais (Figura 14). A análise visual de todos os mapas indicou que os maiores valores dos índices de NDVI e NDWI se encontram nas áreas de vegetação a leste e no caso do NDBI e albedo os maiores índices estão relacionados a área oeste com vegetação rala e solo exposto.

Figura 14. Índices NDVI de A) setembro e B) dezembro, NDWI de C) setembro e D) dezembro, NDBI de E) setembro e F) dezembro e Albedo de G) setembro e H) dezembro



O NDVI (Figura 14A e B) da APA apresentou valores $<0,3$ predominando a oeste nas regiões de pastagem e lavoura e maiores que 0,5 a leste com presença de vegetação nativa. Do período mais seco (Figura 14^a) para o mais chuvoso (Figura 14^B) verifica-se incremento nos valores de NDVI com recuperação da vegetação e aumento do vigor vegetal. Os resultados corroboram os encontrados em Silva et al. (2019), onde se verificou a eficiência do NDVI em monitorar a resposta da vegetação com a precipitação em áreas semiáridas da caatinga.

Além disso, vários autores relataram um atraso na resposta espectral da vegetação em relação a precipitação que pode variar de 30 a 90 dias para a região semiárida da caatinga (ROSA et al., 2013; BARBOSA et al., 2019; LEMOS et al., 2018). Assim, uma análise temporal com o NDVI pode ser útil para monitorar o

comportamento da vegetação ao longo dos meses sob variados regimes de precipitação e seca.

Em relação ao NDWI, Barros et al. (2019) afirmam que este índice tem sido utilizado em pesquisas de regiões semiáridas com bons resultados graças as suas bandas espectrais serem fortemente correlacionadas com a umidade. O NDWI (Figuras 14C e D) apresentou valores negativos a oeste indicativo de baixos valores de umidade que pode ser consequência da remoção da vegetação nativa nestas áreas. Os resultados correspondem aos observados por Ferreira et al. (2012) onde os autores identificaram a vegetação escassa e solo exposto com valores negativos e áreas de agricultura irrigada e corpos hídricos valores positivos. Visualmente, de setembro para dezembro há o aumento dos valores de NDWI concentrados na vegetação florestal a leste e um decréscimo dos valores de NDWI na área central e oeste.

O NDBI auxilia na identificação de áreas impermeáveis que estão mais associadas à áreas urbanas, na APA o NDBI indicou um avanço das áreas com solo exposto do oeste para a área central. Segundo FRANÇA et al. (2012), além de o NDBI ressaltar áreas urbanas e construídas, este índice também é utilizado para identificar ilhas de calor. Nas Figuras 14E e F, os maiores valores estão localizados nas áreas de pastagem lavoura, indicando que a remoção da vegetação aumenta o valor de NDBI.

Visualmente, o NDBI de setembro para dezembro apresentou aumento da área com solo mais exposto com valor de índice mantendo-se constante em $>0,1$. Estes resultados podem estar associados com aumento da temperatura em dezembro pois Almeida et al. (2020) identificaram relação direta entre NDBI e temperatura.

A região a leste (Figura 14E e F) onde predomina vegetação nativa apresentou redução de área em dezembro, mas também apresentou diminuição no NDBI de $-0,2$ para $-0,3$, indicando que em dezembro a vegetação reduziu o valor do índice apenas nas áreas de vegetação mais preservada. A redução do NDBI nesta vegetação pode estar associada ao processo de evapotranspiração, pois como Almeida et al. (2020) ao realizar a evapotranspiração, a vegetação umedece o ambiente e regula a temperatura local.

Segundo Rasul et al. (2018) o NDBI não distingue bem área construída de solo exposto em áreas áridas e semiáridas, mas apresenta bom desempenho para distinguir cidades localizadas em regiões de clima úmido. Ainda segundo estes autores, os índices DBI e DBSI apresentaram melhores resultados para regiões semiáridas. Por esta razão, trabalhos futuros podem analisar o desempenho dos índices NDBI, DBI e DBSI em região semiárida ao longo do tempo em diferentes precipitações, e temperatura.

O albedo apresentou valores mais baixos para áreas de vegetação nativa e valores mais elevados para áreas antropizadas para as duas épocas estudadas (Figuras 14G e H). Este comportamento corrobora outros autores. O albedo tende a aumentar com o solo exposto e seco e tende a diminuir com presença da umidade e da cobertura vegetal (GALVÍNCIO et al., 2006).

Visualmente, apresentou-se valores de albedo mais baixos em setembro e mais altos em dezembro. Este resultado pode se explicado pelo ângulo de elevação solar no momento da obtenção da imagem que em setembro foi de 62.53° e em dezembro foi de 58.76° . Segundo Galvíncio et al. (2006) quanto menor o ângulo solar, maior será a reflexão da energia e maior será o valor do albedo, e quanto maior o valor do ângulo, menor será a reflexão e e por isso o valor do albedo será menor.

Carvalho et al. (2017), ao estudarem o albedo de caatinga preservada em diferentes épocas, também verificaram maiores valores de albedo no período de novembro a janeiro sobre os demais meses do ano.

Verifica-se pela Tabela 11 que houve aumento no valor do índice NDVI de setembro mais seco para dezembro mais úmido tanto pelo valor médio da área total de estudo como pela média de amostras extraídas das feições formação florestal, formação savânica, pastagem e lavoura o que pode indicar que o NDVI é muito sensível a vegetação densa como a vegetação rala ou escassa.

Tabela 11. Média das amostras de pixels para áreas de vegetação florestal, savânica, pastagem e lavoura e média da área total

	NDBI	NDVI	NDWI	Albedo
Florestal				
Setembro	-0,270	0,6773	0,2619	0,1184
Dezembro	-0,323	0,8498	0,3225	0,1268
Savânico				
Setembro	0,07	0,3807	-0,0709	0,1620
Dezembro	-0,021	0,5711	0,0209	0,1640
Pastagem				
Setembro	0,132	0,2673	-0,1321	0,2460
Dezembro	0,134	0,3195	-0,1334	0,2556
Lavoura				
Setembro	0,132	0,1974	-0,1318	0,2968
Dezembro	0,107	0,2867	-0,1006	0,2969
Área total				
setembro	0,040	0,391	-0,034	0,1830
Dezembro	-0,010	0,529	0,009	0,1900

O NDWI por sua vez aumentou pela média da área total e pela média das amostras das formações florestal e savânica, no caso das áreas de pastagem não houve variação e na área de lavoura houve decréscimo deste índice. Pelos resultados pode-se inferir que as áreas de vegetação mais preservada mantem altos os índices NVDI e NDWI em todas as situações da área de estudo mesmo após um período sem precipitação, porém nas áreas antropizadas, apenas o NDVI se mantem elevado pela resistencia da vegetação remanescente a seca, e o NDWI, que é um indice para realce de água e não propriamente para realçar o verde da vegetação, rapidamente decresce de valor pelo solo estar mais exposto nestas áreas antropizadas.

Pela Tabela 11, o NDBI apresentou redução do indice com os meses para a vegetação e pouca diferença nas áreas de pastagem ou lavoura. O albedo apresentou poucas diferenças entre as médias dos meses, destacando-se mais a diferença visual, neste caso indica-se o estudo do albedo em outras épocas, como interanual ou ao longo dos anos.

A Tabela 12 apresenta a correlação dos índices gerados da área de estudo da APA obtida com a função r.covar do software QGIS 3.10.

Tabela 12. Correlação dos índices de vegetação para a APA da Chapada do Araripe em 2019

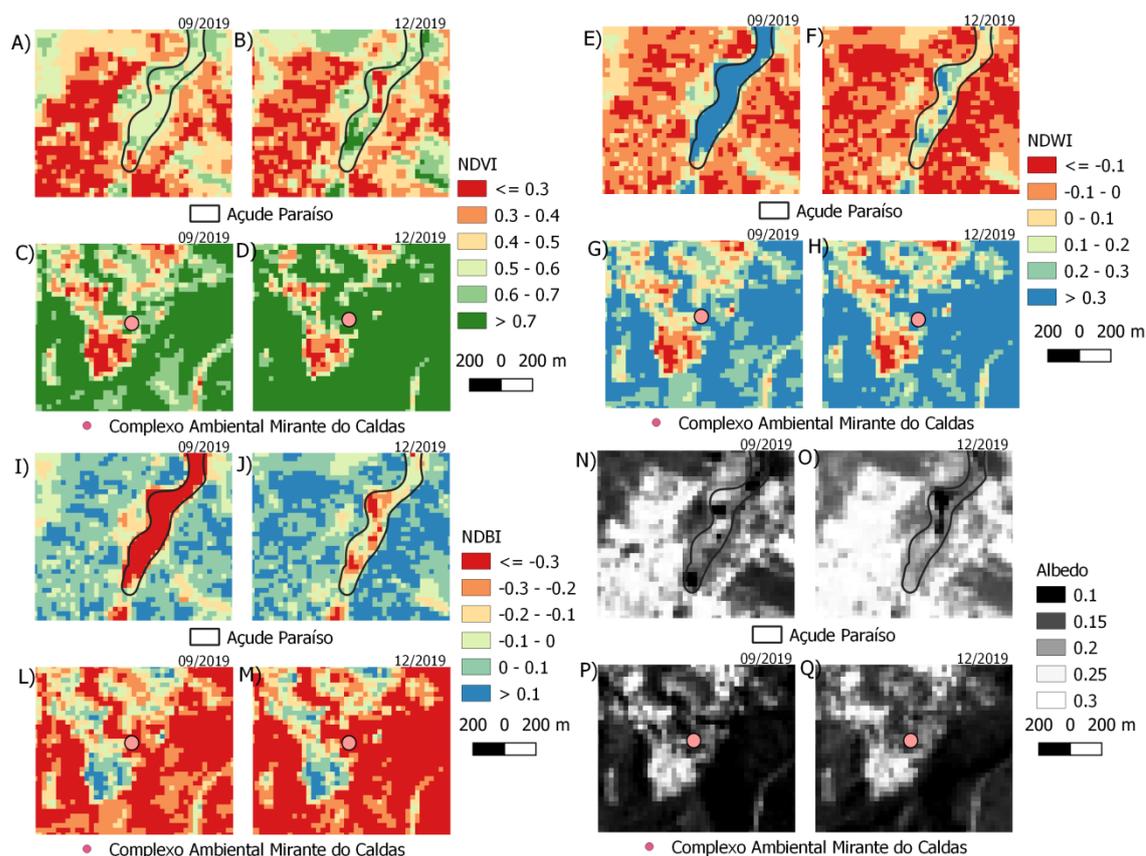
Setembro				
	NDBI	NDVI	NDWI	Albedo
NDBI	1	-0,93	-1	0,49
NDVI		1	0,93	-0,66
NDWI			1	-0,49
Albedo				1
Dezembro				
	NDBI	NDVI	NDWI	Albedo
NDBI	1	-0,91	-1	0,50
NDVI		1	0,91	-0,74
NDWI			1	-0,50
Albedo				1

Os resultados demonstraram que as melhores correlações foram obtidas entre NDVI com NDWI e NDBI nas duas épocas, classificadas como forte correlação. Já o Albedo apresentou média correlação apenas com o NDVI e fraca correlação para os demais índices, tanto em setembro como em dezembro.

A relação inversa entre NDVI e NDBI foi observada por Almeida et al. (2020). Já entre NDVI e NDWI, Szabó et al. (2016) observaram que setores de vegetação, área construída e solo apresentam boa correlação entre os índices, com exceção para o elemento água onde NDVI e NDWI apresentaram diferenças no delineamento da área hídrica, o que pode estar relacionado a capacidade de o NDWI ser mais eficiente na detecção de corpos d'água enquanto o NDVI é mais sensível umidade presente na vegetação.

A Figura 15 apresenta um recorte da região de estudo da APA, destacando-se o Açude Paraíso em Araripe-CE e o complexo Ambiental Mirante do Caldas (CAMC) em Barbalha-CE. O açude Paraíso está localizado a oeste da APA em área de vegetação escassa, e é circundado por solo exposto e área construída, e o complexo Ambiental Mirante do Caldas está na região leste da APA e apresenta uma área urbanizada circundada pela densa vegetação das Unidades de Conservação da APA Chapada do Araripe e do Flona Araripe-Apodi.

Figura 15. Açude Paraíso, Araripe-CE: A) NDVI (setembro), B) NDVI (dezembro), E) NDWI (setembro), F) NDWI (dezembro), I) NDBI (setembro), J) NDBI (dezembro), N) Albedo (setembro), O) Albedo (dezembro); Complexo ambiental Mirante do Caldas, Barbalha-CE: C) NDVI (setembro), D) NDVI (dezembro), G) NDWI (setembro), H) NDWI (dezembro), L) NDBI (setembro), M) NDBI (dezembro), P) Albedo (setembro), Q) Albedo (dezembro)



A redução do volume de água do Açude Paraíso foi bem observado pelos índices NDWI (Figuras 15E e F) e NDBI (Figuras 15I e J) ao comparar os meses de setembro e dezembro de 2019. As áreas vizinhas ao Açude, formadas por um complexo de solo exposto, vegetação escassa e área construída, não apresentaram diferença visual entre os meses estudados para os índices NDVI, NDWI, NDBI e Albedo. Szabó et al. (2016) verificaram o melhor desempenho do NDWI de McFeeters de delimitar o elemento água em relação a outros índices. Pereira et al. (2018) reforça que o NDWI de McFeeters tem por objetivo destacar feições hídricas no terreno.

Em relação a área CAMC, pode-se notar incremento do NVDI (Figuras 15C e D) nas áreas de vegetação de setembro para dezembro, coerente com o que foi observado nas áreas de vegetação densa da Figura 14. O NDVI apresentou boa delimitação entre área de vegetação e área urbana.

No caso do NDWI (Figuras 15G e H) e NDBI (Figuras 15L e M) não houve boa separação entre os limites da vegetação e os limites da área urbana. O NDWI, entretanto, detectou uma variabilidade na área de vegetação densa no mês de dezembro que não foi verificada pelo NDVI. O albedo (Figuras 15P e Q) não apresentou diferenças na vegetação entre as épocas.

O estudo referente a APA da Chapada do Araripe atendeu completamente o objetivo de analisar a resposta espectral da vegetação após diferentes precipitações acumuladas mensais e parcialmente os objetivos de analisar a sensibilidade espectral e analisar a correlação espectral da cobertura do solo com índices NDVI, NDWI, NDBI e albedo nos meses de setembro e dezembro de 2019, neste caso, as análises foram realizadas apenas com o sistema sensor OLI-LANDSAT 8.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram investigadas características espectrais da cobertura do solo do Polo Gesseiro do Araripe e da APA da Chapada do Araripe, localizado na Mesorregião do Sertão de Pernambuco por meio de índices físicos.

Nas análises realizadas no Polo Gesseiro, o $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{OLI}$ e $NDVI_{FUSÃO}$ representaram de forma satisfatória a dependência da vegetação pela precipitação e a correlação foi classificada como forte entre o $NDVI_{MUX}$ e sua versão fusionada $NDVI_{FUSÃO}$. O $NDVI_{MUX}$ e $NDVI_{OLI}$ por outro lado, apresentaram média correlação.

Visualmente, pela estatística descritiva e pelo box-plot, o $NDVI_{MUX}$ e o $NDVI_{FUSÃO}$ foram semelhantes. O NDVI destacou diferentes elementos da superfície terrestre e o NDWI destacou a água de outros elementos. As imagens geradas pelos sensores MUX e PAN delimitaram com melhor precisão os elementos da superfície terrestre graças a sua melhor resolução espacial. O uso de sensoriamento remoto mostrou com clareza como o NDVI decai em áreas antropizadas de pastagem e urbana no Polo Gesseiro, com menores valores para áreas com solo mais exposto.

Trabalhos futuros podem estudar área de caatinga com diferentes índices de água (como a relação Green-SWIR e NIR-SWIR de Szabó et al. (2016)). Da mesma forma, a área de caatinga pode ser estudada com sensores com bandas com comprimento de onda mais semelhantes como CBERS-4-Sentinel-2 e Landsat-8-Rapideye.

Em relação a APA da Chapada do Araripe, os índices espectrais demonstraram que a variabilidade espacial e temporal da região da APA está relacionada tanto a ação antrópica presente na região quanto a eventos climáticos de precipitação que atuam sobre a vegetação e a paisagem natural. Dentre os índices utilizados, o NDVI e NDWI se destacaram no estudo da resposta da vegetação sob condições de seca e precipitação. O índice NDBI e o albedo não apresentaram distinção entre os meses estudados. Neste caso, sugere-se utilizar o NDBI e o albedo associado a outros índices e a outras variáveis climáticas para avaliar eficiência em áreas semiáridas.

Pela relevância da APA Chapada do Araripe e pela presença de áreas já

antropizadas com pastagem e lavoura, torna-se importante monitorar os processos de uso e ocupação do solo e os fatores que podem estar pressionando a região como a exploração de gipsita em seu entorno.

O uso do sensoriamento remoto mostrou-se eficiente no monitoramento de uso e ocupação do solo de áreas do Polo Gesseiro e da APA da Chapada como existe uma vasta variedade de sensores e técnicas, sugere-se que trabalhos futuros podem utilizar outros índices e outros sensores para estudar estas duas áreas de grande relevância ambiental e econômica.

8 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. I. S.; SILVA, L. A. P.; LEITE, M. E.; LAURENTINO, C. M. M.; MARQUES, S. C. S.; LEITE, M. R. Ilhas de calor urbano em Montes Claros – MG. **Revista Do Departamento De Geografia**, v.40, p.120-131, 2020.
- ALVES, C.C.E.; BEZERRA, L.M.A.; MATIAS, A.C.C. A importância da conservação/preservação ambiental da Floresta Nacional do Araripe para a região do Cariri - Ceará/Brasil. **R. Geogr. Am. Central**, Número Especial, p.1-10, 2011.
- ALVINO, F. C. G.; ALEMAN C. C.; FILGUEIRAS, R.; ALTHOFF, D.; da CUNHA, F. F. Vegetation indices for irrigated corn monitoring. **Engenharia Agrícola**, v.40, n.3, p.322–333, 2020.
- ANDRADE, B. S.; MELO, M. R. S.; SILVA, M. H. S. Geoprocessamento aplicado a análise da cobertura e uso da terra na área de proteção ambiental dos mananciais do Córrego Lajeado, Campo Grande -MS. **Sociedade e Território –Natal**, v.31, n.1, p.200–221, 2019.
- ANDRADE, C. B.; OLIVEIRA, L. M. M.; OMENA, J. A. M.; VILLAR, A. C.; GUSMÃO, L.; ROGRIGUES, F. B. Avaliação de índices de vegetação e características fisiográficas no Sertão Pernambucano. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.4, n.1, 2018.
- ARAÚJO, A. L.; BRAGA, C.C.; SILVA, B.B. Variação do NDVI na Chapada do Araripe com dados Landsat 5 - TM. In: III Simpósio Internacional de Climatologia, 2009, Canela/RS.
- ARAÚJO, S. M. S. Potencialidades ambientais do polo gesseiro do araripe. In: Simpósio Polo gesseiro do araripe: potencialidades, problemas e soluções, 2014, Recife. **Anais[...]**. Recife: UFRPE, 2014, 1-28.
- AZEVEDO, S. C.; CARDIM, G. P.; PUGA, F.; SINGH, R. P.; SILVA, E. A. Analysis of the 2012-2016 drought in the northeast Brazil and its impacts on the Sobradinho water reservoir, **Remote Sensing Letters**, v.9, n.5, p.438-446, 2018. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1437290
- BACALHAU, J.R.; NETO, A.R.; OLIVEIRA, L.M.M. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.2, p.283-93, 2017.
- BARBOSA, A.H.S; CARVALHO, R. G.; CAMACHO, R. G. Aplicação do NDVI para a Análise da Distribuição Espacial da Cobertura Vegetal na Região Serrana de Martins e Portalegre – Estado do Rio Grande do Norte. **Revista do Departamento de Geografia USP**, v.33, p.128-143, 2017.
- BARROS, A. C.; LIMA, A. A.; TAGLIARINI, F. S. N.; BARROS, Z. X. Estimativa de

mudanças temporais com o cálculo de índices de vegetação do município de Itaberá (SP). **Energia na agricultura**, v.32, n.2, p.195–199.

BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.

BETHUME, S.; MULLER, F; BINARD, M. Adaptive intensity matching filters: a new tool for multi-resolution data fusion, Proceedings of the Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, **Remote Sensing and Radar**, p. 671–680, 1997.

BEZERRA, U. A. **Índices espectrais utilizando os sensores OLI/Landsat-8 e MSI/Sentinel-2, na bacia hidrográfica do rio Moxotó-PE**. 2019. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

BILAR, A. B. C.; PIMENTEL, R. M. M.; CERQUEIRA, M. A. Monitoramento da cobertura vegetal através de índices biofísicos e gestão de áreas protegidas. **Geosul**, v.33, n.68, p.236-259 , 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas** / Coord. Técnica de Marina Dalla Costa et al.; – Brasília: ANM, 2020a. 35 p.: il.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Biomassa para energia no Nordeste: atualidade e perspectivas. Brasília: Ministério do Meio Ambiente**; Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento [2018a]. Disponível em: http://www.mma.gov.br/phocadownload/gestão_territorial/desertificação/livro_APNE_NE_AGO20.pdf. Acesso em: 01 Jan 2021.

CAMPOS, J.C.; SILLERO, N.; BRITO, J.C. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara-Sahel transition zone. **J. Hydrol**, v.464, p.438–446, 2012.

CARVALHO, H. F. S.; MOURA, M. S. B.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; RODRIGUES, C. T. A.; SILVA, T. G. F. Albedo de Caatinga preservada comparado com cultivo de cana-de-açúcar irrigada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., 2017, Juazeiro, BA. A agrometeorologia na solução de problemas multiescala: **anais**. Petrolina: Embrapa Semiárido; Juazeiro: UNIVASF; Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2017.

CHAGAS, M.G.S.; GALVÍNCIO, J.D.; PIMENTEL, R.M.M. “Avaliação da dinâmica espectral da vegetação de Caatinga em Arcoverde, Pernambuco”. **Revista de Geografia (Recife)**, 2008.

CUNHA, J.; NÓBREGA, R. L. B.; 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, 2020.

DAMASCENO, M. L. **Análise da biomassa florestal do polo gesseiro da Região do Araripe – Pernambuco a partir de índices de vegetação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2020.

DEVORE, J.L. 2006. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências. São Paulo, Cengage Learning. 191 p.

Embrapa - Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. **LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**, 2020. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>>. Acesso: 01 Jan 2021.

FERNANDES, M. F.; BARBOSA, M. P. **Aplicações dos Indicadores Socioeconômicos e Ambientais no Modelo DPSIR (Força Motriz/Pressão/Estado/Impacto/Resposta) e Influências na Desertificação nos Municípios de Araripina-PI Crato e Barbalha-CE e Marcolândia-PI**. Revista Brasileira de Geografia Física, v.4, p.722-737, 2011.

FERREIRA, J. M. S.; FERREIRA, H. S.; SILVA, H. A.; SANTOS, A. M.; GALVÍNCIO, J. D. Análise espaço-temporal da dinâmica da vegetação da caatinga no município de Petrolina- PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.5, n.4, p.904-922, 2012.

FRANÇA, A. F., TAVARES JUNIOR, J. R., MOREIRA FILHO, J. C. C. Índices NDVI, NDWI e NDBI como ferramentas do mapeamento temático do entorno da lagoa Olho D'Água em Jaboatão dos Guararapes. In: **Anais... IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. p1-9. Recife. 2012.

FRANCISCO, C.; RUIZ, P.; ALMEIDA, C.; GRUBER, N.; ANJOS, C. Análise do impacto da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação por diferença normalizada a partir de imagem LANDSAT 8/OLI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, p.076-086, 2020.

FRANCISCO, R. F.; BRAGA, A. C. O. Fusão de imagens multissensor para a identificação de feições erosivas no município de Bauru/SP. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v.9, n.1, p.021-035, 2021.

FUNDAJ. **Saiba quais são as características da Caatinga**. 2019. Disponível em: <https://www.fundaj.gov.br/index.php/conselho-nacional-da-reserva-da-biosfera-da-Caatinga/9193-saiba-quais-sao-as-caracteristicas-da-Caatinga>. Acesso em: 20 jul. 2020.

GADELHA, F.H.L.; SILVA, J.A.A.; FERREIRA, R.L.C.; SANTOS, R.C.; TAVARES, J.A. Produtividade de clones de eucaliptos em diferentes sistemas de manejo para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.35, p.263-270, 2015.

- GALVÍNCIO, J. D.; BADARAU, M. S.; BARBOSA, V.V.; FREIRE, F. J.; SANTOS FREIRE, M. B. G.; SOUZA, W. M. Avaliação do estágio de regeneração do bioma Caatinga na microrregião do Araripe, com sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, p.986-996, 2016.
- GALVÍNCIO, J.D.; CORRÊA, A.C.B.; ARAÚJO, M.S.B. Determinação do albedo no município de Belem do São Francisco, com base em imagens Landsat 7. *Revista de Geografia*, v.23, n.3, p.103-118, 2006.
- GANEM, K. A.; DUTRA, A. C.; OLIVEIRA, M. T. DE; FREITAS, R. M. DE; GRECCHI, R. C.; VIEIRA, R. M. DA S. P.; ARAI, E.; SILVA, F. B.; SAMPAIO, C. B. V.; DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E. Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra – Oportunidades e Desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.72, p. 829-854, 2020.
- GAO, B.C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote sensing of environment**, v.58, p.257-266, 1996.
- GEOSGB - sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil. **Dados, informações e produtos do serviço geológico do Brasil**. 2018. Disponível em:<<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acesso: 01 Jan 2021.
- GRANJA, C. V.A.; CAVALCANTE, E. P.; CAFFÉ FILHO, H. P.; SIQUEIRA, M. S.; NASCIMENTO, W. Degradação ambiental: exploração de gipsita no polo gessoso do Araripe. **Revista Multidisciplinar e de Psicologia**. v.11, n.36, 2017.
- HERMANN, P. B.; TODT, V.; REIS, M. S. Análise comparativa dos modelos de vegetação ndvi e savi a partir de imagens CBERS-4/MUX e landsat-8/OLI para o município de São Francisco De Paula/RS. In: **anais do xix simpósio brasileiro de sensoriamento remoto**, 2019, Santos. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/analise-comparativa-dos-modelos-de-vegetacao-ndvi-e-savi-a-partir-de-imagens-cbers-4-mux-e-landsat-8-oli-para-o-municipi>> Acesso em: 06 out. 2021.
- IBGE – instituto brasileiro de geografia e estatística – **Semiárido brasileiro**. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=sobre>. Acesso: 7 Jan 2021.
- IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ed.; Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, 2012. 91p.
- IBGE/DGC. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Base Cartográfica Contínua, ao milionésimo** - BCIM 2016: 5ª versão digital. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:

http://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bcim/ver_sao2016/shapefile/>. Acesso: 8 Jan 2021.

ICMBIO, **Dados gerais UC Julho 2019**; Disponível em:

https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/servicos/geoprocessamento/DCOL/dados_tabulares/DadosGerais_UC_julho_2019.pdf, Acesso: 7 Jan 2020.

INMET, 2020. **Bdmep - banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa** [online]. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso: 20 Mai 2021.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Landsat**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>>. Acesso em: 01 Jan 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Sobre o CBERS**. 2018. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/index.php>. Acesso: 20 jul. 2020.

INSA – Instituto nacional do Semiárido, **SIGSAB (sistema de gestão da informação do conhecimento do semiárido brasileiro)**, 2014. Disponível em: <http://sigsab.insa.gov.br/acervoDigital>. Acesso: 8 Jan 2021.

JOHNSON, B. Effects of pansharpening on vegetation indices. **ISPRS Int. J. Geo-Inf.**, v.3, p.507–522, 2014.

KPALMA, K; EL-MEZOUAR, M. C.; TALEB, N. Recent Trends in Satellite Image Pansharpening techniques. **1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering**, Jun 2014, Vrnjacka Banja, Serbia. fahal-01075703f

KSHETRI, T. NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/ndvi-ndbi-ndwi-calculation-using-landsat-7-8-tek-bahadur-kshetri>>. Acesso: 25 Ago. 2020.

LEMOS, J. R.; MEGURO, M.; BISPO, W. A. S.; BLANE, K.; BITENCOURT, M. D. Variação temporal de índices de vegetação obtidos por imagens de satélites para indicar a cobertura vegetal da Caatinga da Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará-Brasil. **Revista Espacios**. v.39, p.7-24, 2018.

LISBOA, I. P.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; BARROS, P.P. S.; FIORIO, P. R.; CERRI, C.C. Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal. **Agronomy**, v.8, n.196, 2018.

MAIA JÚNIOR, L. P.; LOURENÇO, R. W. Impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a variabilidade do albedo na bacia hidrográfica do rio Sorocabaçu (Ibiúna - SP). **Revista Brasileira de Climatologia**. v.27, p.1-20, 2020.

- MANDANICI, E.; BITELLI, G. Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use. **Remote Sensing**, v.8, p.10-14, 2016.
- MARTINS, P. T. DE A.; PAULINO BORGES, P.. Satélite sino-brasileiro de recursos terrestres na literatura científica global: tendências a partir de uma análise cienciométrica. **Boletim Goiano De Geografia**, v.40, p.1-25, 2020.
- MARTINS, V.S.; SOARES, J.V.; NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.C.F.; PINTO, C.T.; ARCANJO, J.S.; KALEITA, A. Continental-scale surface reflectance product from CBERS-4 MUX data: Assessment of atmospheric correction method using coincident Landsat observations. **Remote Sens. Environ.** v.218, p.55–68, 2018.
- MARUJO, R. F. B.; FONSECA, L. M. G.; KORTING, T. S.; BENDINI, H. N. Spectral normalization between Landsat-8/OLI, Landsat- 7/ETM+ and CBERS-4/MUX bands through linear regression and spectral unmixing. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA**, 18. (GEOINFO), 2017, Salvador. Anais do 18o. Simpósio Brasileiro de Geoinformática... São José dos Campos: INPE, 2017. p. 273-282. Pendrive, On-line. ISSN 2179-4820.
- MCFEETERS, S.K. “The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features”. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, p.1425-1432, 1996.
- MEDEIROS, S. S.; CAVALCANTE, A. M. B.; MARIN, A. M. P.; TINÔCO , L. B. M.; SALCEDO, I. H.; PINTO, T. F. Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro. Campina Grande: INSA, 2012. 103p
- MHANGARA, P.; MAPURISA, W.; MUDAU, N. Comparison of Image Fusion Techniques Using Satellite Pour l’Observation de la Terre (SPOT) 6 Satellite Imagery. **Appl. Sci.**, v.10, n.1881, 2020.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Caatinga**. 2018a. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomas/Caatinga>. Acesso: 20 jul. 2020.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Cerrado**. 2018b. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/Cerrado>. Acesso: 06 jan. 2021.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Mata Atlântica**. 2018c. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atl%C3%A2ntica_emdesenvolvimento.html. Acesso: 06 jan. 2021.
- MOURA, M.S.B.; GALVINCIO, J; BRITO, L.D.L.; SOUZA, L.D.; SÁ, I.; SILVA, T.G.F. Clima e água de chuva no Semi-Árido. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE). 2007.
- NASCIMENTO, E. F.; AZEVEDO, L. S.; CANDEIAS, A. L. B.; TAVARES JÚNIOR, J. R. Comparison of water index for MUX / CBERS-4 digital number and

- monochrome reflectance images. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.10, p.34-44, 2020.
- NEVES, L. Z.; MUCIDA, D. P. Comparação de índices de vegetação entre imagens CBERS, Landsat e Rapideyepara área do Cerrado Brasileiro. **Revista Espinhaço**, v.9, p.43-51, 2020.
- OLIVEIRA, W. C.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B.; MACÊDO, K. G.; LIMA JÚNIOR, J. C. Energy balance in areas with different land uses in the Chapada do Araripe. **Rev.Geama**, v.3, p.252-256, 2017.
- OUZEMOU, J. E.; HARTI, A. E.; LHISSOU, R.; MOUJAHID, A. E.; BOUCH, N.; OUAZZANI, R. E.; BACHAOUI, E. M.; GHMARI, A. E. Crop type mapping from pansharpened Landsat 8 NDVI data: A case of a highly fragmented and intensive agricultural system, **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.11, p.94-103,2018.
- PEREIRA, L. E.; AMORIM, G.; GRIGIO, A. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Análise Comparativa entre Métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em Área Úmida Continental. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. V.41, n. 2, p.654-662, 2018.
- PEREIRA, O. J. R.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Image fusion of Sentinel-2 and CBERS-4 satellites for mapping soil cover in the Wetlands of Pantanal, **International Journal of Image and Data Fusion**, p.8, v.148-172, 2017.
- PERRELLA, C. F. **Uso de imagens de satélite para o diagnóstico da dinâmica da fitofisionomia em dois municípios do polo gesseiro do araripe: Trindade (PE) e Ipubi (PE)**. 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Recife, Pernambuco.
- PINTO, C. T.; PONZONI, F. J.; CASTRO, R. M.; LEIGH, L.; KAEWMANEE, M.; AARON D.; HELDER, D. Evaluation of the uncertainty in the spectral band adjustment factor (SBAF) for cross-calibration using Monte Carlo simulation, **Remote Sensing Letters**, v.7, p.837-846, 2016b.
- PINTO, C.; PONZONI, F.; CASTRO, R.; LEIGH, L.; MISHRA, N.; AARON, D.; HELDER, D. First in-flight radiometric calibration of MUX and WFI onboard CBERS-4. **Remote Sensing**, v.8, p.1-22, 2016a.
- PISANI, R. J.; BUENO, V.C.; FIUZA, J. R.; ESTELA, P. V.M. avaliação de técnicas de fusão de imagens orbitais utilizando produtos do satélite cbers 4 para a Apa Do Rio Machado-MG. **Geografia**. v.29, 2019.
- PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, Y. E. KUPLICH, T. M. Sensoriamento Remoto da Vegetação. 2ª ed. Revisada e ampliada. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

- PONZONI, F.J.; EPIPHANIO, J.C.N.. Calibração absoluta em vôo dos sensores do CBERS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.64, p.813-820, 2012.
- QUEIROZ FILHO, A. A. **Gipsita**. 2018. Disponível em:<<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/>>. Acesso: 01 Jan 2021.
- RAMALHO, M. F. J. L. A fragilidade ambiental do Nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. **Sociedade e Território**, v.25, n.2, EDIÇÃO ESPECIAL, p. 104-115, 2013.
- RAMOS, R. R. D.; MELO JÚNIOR, J. C. F. Mapping of the current land use in part of the Irrigated Perimeter Nilo Coelho, Petrolina-PE, Brazil. **Comunicata Scientiae**, v.10, p.89-97, 2019.
- RASUL, A.; BALZTER, H.; IBRAHIM, G.; HAMEED, H.; WHEELER, J.; ADAMU, B.; IBRAHIM, S.; NAJMADDIN, P. Applying Built-Up and Bare-Soil Índices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates. **Land**. v.7, p.81, 2018.
- REIZ, C.; ZANIN, R. B. ; MARTINS, E. F. O. ; FILGUEIRAS, J. L. D. ; EVARISTO, J. W. . Aplicação de Contornos Ativos na Extração de Feições em Imagens LANDSAT 8 e CBERS 4. In: Raissa Rachel Salustriano da Silva-Matos, Nitalo André Farias Machado, Hosana Aguiar Freitas de Andrade (org). As ciências exatas e da terra e a interface com vários saberes 2. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020. p. 16-21.
- ROSA, P. A., F. M. BREUNIG, R. BALBINOT, L. S. GALVÃO. “Dinâmica da floresta do Parque Estadual do Turvo com índices de vegetação”, **Floresta e Ambiente**, v.20, p. 487-499, 2013.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1. Remote Sensing Cent. Texas A&M University, College Station.
- SALVATIERRA, A. C.; LADLE, L.H.; BARBOSA, R.J.; CORREIA, H.; MALHADO, A.C.M. Protected areas buffer the Brazilian semiarid biome from climate change. **Biotropica**, v.49, p.753-760, 2017.
- SANTANA, O.; ENCINAS, J.; SOUSA, B.; MONTE, S.; COSTA, V.. Aridity index over time in five ecosystems on semiarid. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.9, p.138-145, 2019.
- SANTIAGO, D. S.; CORREIA FILHO, W.L.F.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; SILVA JÚNIOR, C.. Mathematical modeling and use of orbital products in the environmental degradation of the Araripe Forest in the Brazilian Northeast. **Model. Earth Syst. Environ**. v.5, p.1429–1441, 2019.

- SANTOS, A.; LOPES, P. M. O.; SILVA, M. C. S.; JARDIM, A. M. R. F.; MOURA, G. B. A.; FERNANDES, G. S. T.; SILVA, D. A. O.; SILVA, J. L. B.; RODRIGUES, J. A. M. R.; SILVA, E. A. S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Causes and consequences of seasonal changes in the water flow of the São Francisco river in the semiarid of Brazil, **Environmental and Sustainability Indicators**, v.8, 2020.
- SANTOS, J. P. O.; EL-DEIR, S. G. Produção de gesso no araripe pernambucano: impactos ambientais e perspectivas futuras. **Revista AIDIS**, v.12, p.496-509, 2019.
- SANTOS, C.A.G.; NASCIMENTO, T.V.M.; DA SILVA, R.M. Analysis of forest cover changes and trends in the Brazilian semiarid region between 2000 and 2018. **Environ Earth Sci**, v.79, 2020a.
- SANTOS, W. B.; MARANGON, L. C.; FREIRE, F. J.; BRAZ, R. L.; TORRES, J. E. L.; SANTOS, J. N. B. Vegetação lenhosa de regiões semiáridas em diferentes altitudes. **Ciência Florestal**, v.30, p.161-175, 2020b.
- SANTOS, W.M.; SOUZA, R.M.S.; SOUZA, E.S.; ALMEIDA, A.Q.; ANTONINO, A.C.D. Variabilidade espacial da sazonalidade da chuva no semiárido brasileiro. **Jornal of Environmental Analysis and Progress**. v.04, p.368-376, 2017.
- SHUAI, Y.; MASEK, J.G.; GAO, F.; SCHAAF, C.B.; HE, T. An approach for the long-term 30-m land surface snow-free albedo retrieval from historic Landsat surface reflectance and MODIS-based a priori anisotropy knowledge. **Remote Sensing Environment**. v.152, p.467-479, 2014.
- SILVA, D. V.; CRUZ, C. B.. Tipologias de Caatinga: Uma Revisão em Apoio a Mapeamentos Através de Sensoriamento Remoto Orbital e GEOBIA. **Revista Do Departamento De Geografia**, v.35, p.113-120, 2018.
- SILVA, J.L.B., MOURA, G.B.A., SILVA, E.F.F., LOPES, P.M.O., SILVA, T.T.F., LINS, F.A.C., SILVA, D.A.O., ORTIZ, P.F.S. Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, p.1-10, 2019.
- SILVA, R. M. A.. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semi-árido. **Soc. estado.**, v.18, p.361-385, 2003.
- SINDUSGESSO, **Polo gesseiro do Araripe**, 2017. Disponível em: <<http://www.sindusgesso.org.br/wp-content/uploads/2017/07/ESTUDO-T%C3%89CNICO-Gesseiro-Vers%C3%A3o-Final-NENI.pdf>>. Acesso: 01 Jan 2021.
- SOKOLOSKI, L.J.F.; FERREIRA, M.R.A.; VITERBO, G.A.; BELOTTI, F.M.; VIEIRA, E.M. Estudo da vulnerabilidade natural da sub-bacia do Rio Piracicaba/MG

utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG). **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, p.211-222, 2019.

SZABÓ, S., GÁCSI, Z., BALÁZS, B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Acta Geographica Debrecina, Landscape and Environment*, v.10, v.3–4, p.194–202, 2016.

URBANO, J. J. **Estudo numérico do processo de calcinação da gipsita em fornos rotativos com aquecimento indireto a óleo**. 2013. Tese de Doutorado, PPGEM, UFPE.

USGS (2019). **Landsat 8 Data Users Handbook**. Disponível em: https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf. Acesso: 06 Ago. 2020.

VALENCIA, L. V.A. **Comportamento espectral das culturas de milho, arroz e soja, usando imagens dos satélites Sentinel-2, Cbers-4 e Landsat-8**. 2020. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, Programa de Pós-Graduação em Ciências e aplicações Geoespaciais, São Paulo, São Paulo.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **Int. J. Remote Sens**, v.27, p.3025–3033, 2006.