

Spatial evolution of land use and land cover for the Tatu-Bola Wildlife Refuge - Pernambuco, using orbital images

Tiago H. de Oliveira^{*}, Josemary S. e S. Oliveira^{**}, Rejane M. de M. Pimentel^{***},
Josicléda D. Galvêncio^{****}

^{*} Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Prefeitura da Cidade do Recife, Av. Cais do Apolo, 925, Recife – PE. E-mail: thdoliveira50@gmail.com

^{**} Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGeo), Universidade Federal de Pernambuco, E-mail: josy.santos04@gmail.com

^{***} Professora Doutora do Departamento de Biologia/Botânica – Universidade Federal Rural de Pernambuco, E-mail: rejanemmpimentel@gmail.com

^{****} Professora Titular do Departamento de Ciências Geográficas – Universidade Federal de Pernambuco, E-mail: josicleda.galvencio@ufpe.br

Received 08 October 2021; accepted 26 March 2022

Abstract

This article aims to analyze NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), and NDBI (Normalized Difference Built-up Index) radiometric indices for TM and OLI sensor scenes aboard the LANDSAT satellite. The study area is the Tatu-Bola Wildlife Refuge, created in March 2015 through State Decree number 41,546, and its surroundings. The study aimed to monitor the spatial and temporal evolution of land use and land cover in a period before and after the implementation of the Armadillo-Bola Wildlife Refuge, using indices of vegetation (NDVI), moisture (NDWI), and exposed soil (NDBI) and its relationship with the surroundings. TM and OLI images (orbit and point 217-066) were used on board the LANDSAT satellite 5 (23-05-1987, 15-05-1996, and 01-02-2005) and 8 (28-01-2015 and 17-03-2021), radiometrically and geometrically corrected and obtained by accessing EarthExplorer, with the calculation of radiance and reflectance being performed, and the indices applied. In order to better identify the area with vegetation and exposed soil, the RGB composition was performed, with NDBI, NDVI, and NDWI indices for Landsat images and fusion of multispectral and panchromatic bands in WPM sensor images from the CBERS-4A satellite from 23-08-2020 (orbit and point 198-124) and 18-09-2020 (199-124). Digital numbers of cloud and shadow pixels were excluded through supervised classification. Between 1987 and 2021, it was possible to observe a decrease in vegetation cover, especially around the RVS Armadillo-balla, and an increase in area, with NDVI values lower than 0.40. The Refuge area in Petrolina has the largest amount of deforested area. The use of RGB composition of the indices and the merged images from the CBERS-4A satellite, with a spatial resolution of 2 m, present a significant improvement in identifying areas of exposed soil and dry vegetation.

Keywords: Caatinga, vegetation index, landsat, cbers-4a, *Tolypeutes tricinctus*.

Evolução espaço temporal do uso e cobertura da terra para o Refúgio de Vida Silvestre Tatu-Bola - Pernambuco, utilizando imagens orbitais

Resumo

Este artigo aborda a análise dos índices radiométricos NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index) e NDBI (Normalized Difference Built-up Index) para cenas do sensor TM e OLI a bordo do satélite LANDSAT. A área de estudo é o Refúgio de Vida Silvestre Tatu-Bola, criado em março de 2015 através do Decreto estadual número 41.546, e seu entorno. O estudo objetivou acompanhar a evolução espaço temporal do uso e cobertura da terra em um período anterior e posterior à implantação do Refúgio de Vida Silvestre Tatu-Bola, utilizando índices de vegetação (NDVI), umidade (NDWI) e solo exposto (NDBI) e sua relação com o entorno. Foram utilizadas imagens TM e OLI (órbita e ponto 217-066) a bordo do satélite LANDSAT 5 (23-05-1987, 15-05-1996 e 01-02-2005) e 8 (28-01-2015 e 17-03-2021), corrigidas radiometricamente e geometricamente, e obtidas por meio de acesso ao EarthExplorer, sendo realizado o cômputo de radiancia e reflectância e aplicados os índices citados anteriormente. Visando uma melhor identificação de área com vegetação e com solo exposto foi realizada a composição RGB, com os índices NDBI, NDVI e NDWI para as imagens Landsat e fusão de bandas multiespectrais e pancromáticas em imagens do sensor WPM do satélite CBERS-4A de 23-08-2020 (órbita e ponto 198-124) e

18-09-2020 (199-124). Os números digitais de pixels de nuvem e sombra foram excluídos por meio de classificação supervisionada. Entre os anos de 1987 e 2021, foi possível observar diminuição de cobertura vegetal, principalmente no entorno da RVS Tatu-bola e aumento de área, com valores de NDVI inferiores a 0,40. A área do Refúgio em Petrolina apresenta maior quantidade de área desmatada. A utilização de composição RGB dos índices, assim como as imagens fusionadas do satélite CBERS-4A, com resolução de espacial de 2 m, apresentam melhora significativa para a identificação de áreas de solo exposto e com vegetação seca.

Palavras-Chave: Caatinga, índices de vegetação, landsat, cbers-4a, *Tolypeutes tricinctus*.

Introdução

O Sistema Estadual de Unidades de Conservação (SEUC), instituído pela Lei Estadual nº 13.787 de junho de 2009, define que as Unidades de Conservação são “espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituídas pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob o regime especial de administração, à qual se aplicam garantias adequadas de proteção.”

Conforme o Artigo 7º (Lei Estadual nº 13.787), a SEUC subdivide as unidades de conservação em dois grupos: Unidades de Proteção Integral e Unidades de Uso sustentável. Sendo assim, o objetivo básico das Unidades de Proteção Integral é preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, com exceção dos casos previsto na lei.

A SEUC distribui as categorias de manejo das unidades de conservação do grupo de Proteção Integral em: Reserva Biológica (REBIO), Estação Ecológica (ESEC), Parque Estadual (PE), Monumento Natural (MONA), e Refúgio de Vida Silvestre (RVS).

Criado em 16 de março de 2015 (Decreto nº 41.546), o Refúgio de Vida Silvestre Tatu-Bola foi implantado a partir de estudos e campanhas voltadas à conservação do Tatu-Bola (*Tolypeutes tricinctus*) (Linnaeus, 1758; Marinho-Filho et al., 1997; Chiarello et al., 2008), espécie endêmica do Brasil, restrita à Caatinga e áreas do Cerrado, categorizada na lista Oficial da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção, como espécie em perigo de extinção (Machado et al., 2008; ICMBio, 2014).

Com sua dieta sendo constituída por formigas, cupins, pequenos invertebrados e alguns frutos, esta espécie utiliza tocas e galerias abandonadas por outras espécies, podendo cobrir-se de folhas e utilizar depressões do relevo para se abrigar (Reis et al., 2006; Chiarello et al., 2008)

No entorno da unidade de conservação estão distribuídos 51 projetos de Assentamento do INCRA com, aproximadamente, 2.926 famílias,

comunidades indígenas e quilombolas, além de colônias de pescadores, desenvolvendo atividades de agricultura de sequeiro, em alguns casos irrigados, e criação de bovinos, caprinos e ovinos.

Alguns dos perímetros dos assentamentos foram parcialmente sobrepostos pelo limite instituído do refúgio, o que ocasionou uma discussão entre a comunidade local e o poder público, após sua criação (Lacerda et al., 2017). Lacerda et al. (2017) afirmam que, conforme reuniões ordinárias realizadas pelo CONSEMA – Conselho Estadual de Meio Ambiente, representantes das comunidades locais alegaram a falta de consulta e informação de detalhes sobre a instituição da unidade de conservação pelo poder público.

O Artigo 13 da SEUC (Lei Estadual nº 13.787) “O Refúgio de Vida Silvestre – RVS tem como objetivo proteger ambientes naturais onde se asseguram condições para a existência ou reprodução de espécies ou comunidades da flora local e da fauna residente ou migratória... de ser constituído por áreas particulares desde que seja possível compatibilizar os objetivos da unidade com a utilização da terra e dos recursos naturais do local pelos proprietários (Pernambuco, 2009).

O bioma Caatinga, exclusivamente brasileiro, constituído por um complexo vegetacional, ocupa uma área de, aproximadamente, 800.000 km², classificado, oficialmente, como Savana Estépica (Veloso et al., 1991) e internacionalmente como parte das Florestas Tropicais Sazonalmente Seca – STDF (Souza et al., 2015; Oliveira Filho et al., 2006; Pennington et al., 2000).

Apesar de sua riqueza em biodiversidade, conforme Leal et al. (2005) “com mais de 932 espécies de plantas vasculares (Giulietti et al., 2004), 148 espécies de mamíferos (Oliveira et al., 2003), 510 espécies de aves (Silva et al., 2003), 167 espécies de répteis e anfíbios (Rodrigues, 2003), 240 de peixes (Rosa et al., 2003) e 187 de abelhas (Zanella & Martins, 2003), com endemismo na Caatinga variando entre 7% e 57% nestes grupos”, além de formações vegetais extremamente importantes e ricos em recursos

genéticos, se apresenta como um dos biomas mais desprotegidos do Brasil (MMA, 2019).

Como principais desafios a serem enfrentados para a conservação da Caatinga está o desmatamento, tendo em vista a utilização de madeira em carvoarias, a recuperação e correta proteção de matas ciliares, além do controle e recuperação de áreas em franco processo de desertificação, como nos núcleos de desertificação do Seridó (RN/PB), Cariris Velhos (PB), Gilbués (PI), Sertão Central (PE), Inhamuns (CE) e Sertão do São Francisco (BA) (Vasconcelos Sobrinhos, 2002).

Tendo em vista as grandes e rápidas mudanças no uso e cobertura da terra, observadas em várias partes do mundo e relatadas em diversas pesquisas, a utilização de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto têm auxiliado no entendimento de diversos processos e auxiliado na identificação de áreas em processo de degradação (Defries et al., 1998; Chen et al., 2006; Gardner et al., 2008; Zeng et al., 2009; Oliveira, et al., 2010; Barlow, et al., 2016; Muposhi et al., 2016; Oliveira et al., 2016; Antongiovanni et al., 2018).

Pesquisas como a realizada por Bezerra et al. (2012), utilizando índices de vegetação, como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), durante o período de 2008 e 2011, demonstram e concluíram como a utilização de imagens de satélites e dados meteorológicos fornecem uma ferramenta eficiente para analisar mudanças espaço-temporais no bioma Caatinga.

Santos et al. (2017), objetivando analisar o efeito da sazonalidade em índices de vegetação em áreas com diferentes usos da terra no Vale do Rio São Francisco, identificaram que o padrão estabelecido pelos índices utilizados permitiu o entendimento da dinâmica da atividade fotossintética da vegetação, onde, nos períodos chuvosos nos primeiros meses do ano, os valores mais expressivos têm relação direta com a atividade fotossintética da vegetação, podendo ser observado, tanto em imagens do sensor OLI Landsat, como MODIS.

Ribeiro et al. (2015) e Antongiovanni et al. (2018), analisando o processo de fragmentação da caatinga em larga escala, apresentam preciosas informações sobre as configurações e rearranjos espaciais e estruturais, afirmando “que a caatinga ainda possui grandes fragmentos com potencial para abrigar populações viáveis de espécies

sensíveis, bem como aquelas com capacidades de movimento através da matriz... porém devida a alta complexidade estrutural dos remanescentes expõe os fragmentos a múltiplas ameaças antrópicas devido ao efeito de borda.”

Morais et al. (2017), avaliando o sequestro de carbono em áreas de caatinga no município de Petrolina – Pernambuco, encontraram maiores valores de carbono sequestrado nos períodos chuvosos, para as áreas de caatinga preservada. Os autores ainda encontraram que “áreas sobre influência de atividades antrópica apresentaram assimilação total e menor sequestro de carbono, tendo em vista que a antropização pode provocar mudanças na composição e fisionomia da vegetação de caatinga, sendo necessária a elaboração e adoção de instrumentos políticos visando a recuperação de áreas degradadas e proteção de remanescentes de caatinga, podendo contribuir para a mitigação do aquecimento global e cumprimento das metas da Política Estadual de Enfrentamento a Mudanças Climáticas.”

Miranda et al. (2018), analisando a dinâmica de desmatamento em floresta seca na bacia do Pontal – Pernambuco, encontraram “30% de perda de cobertura vegetal em um período de 38 anos, tendo observado a conversão de áreas de floresta natural em pastagem de sequeiros ou agricultura, seguida por agricultura irrigada.” Complementam, afirmando que “este processo ocorreu em diversas outras áreas do semiárido pernambucana, levantando a hipótese de que o padrão das chuvas pode estar influenciando na melhora da qualidade da terra para a agricultura ao norte da bacia.”

Tendo em vista a problemática enfrentada pela Caatinga, em face da exploração humana, por meio de desmatamento e consequente fragmentação, assim como, em alguns casos, além da escassez de servidores públicos em quantidade adequada para a correta preservação da fauna e flora nas unidades de conservação e apoio aos moradores de seu entorno, torna-se necessário o acompanhamento das áreas instituídas pelo poder público por meio de novas tecnologias, como o sensoriamento remoto, que fornece imagens de diversos sensores e resoluções de forma gratuita, auxiliando no acompanhamento de mudanças que ocorrem em seu interior ou no entorno.

Diante do exposto, o estudo objetivou acompanhar a evolução espaço temporal do uso e

cobertura da terra em um período anterior e posterior à implantação do Refúgio de Vida Silvestre Tatu-Bola, utilizando índices de vegetação (NDVI), umidade (NDWI) e solo exposto (NDBI) e sua relação com o entorno.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo foi o Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola (coordenada do centroid de latitude -8,709 e longitude -40,453 em SIRGAS 2000) está inserida na região semiárida do estado de Pernambuco nos municípios de Petrolina/PE, Lagoa Grande/PE e Santa Maria da Boa Vista/PE (Figura 1).

Apresenta uma área total de 110.110,25ha e perímetro de 425.117,95m, porém, como informado na ficha técnica da

Unidade de Conservação disponibilizado pela Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH), não possui plano de manejo e conselho gestor.

A área está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, com vegetação classificada como Caatinga Hiperxerófila, com trechos de Floresta Caducifólia. Apresenta altitude variando entre 300 e 778 m, clima tropical semiárido quente, com chuvas de verão e período chuvoso entre os meses de novembro e abril. A temperatura média é de 26°C e a precipitação média é de 505,64mm (Estação Agrometeorológica Bebedouro – EMBRAPA, 2021).

Para os índices utilizados, foram inseridos os limites do R.V.S. Tatu Bola, em todas os mapas, apenas como referência da área, devendo ser levado em consideração o fato que o refúgio só foi implantado em 2015, o que conferia menor proteção à área em anos anteriores.

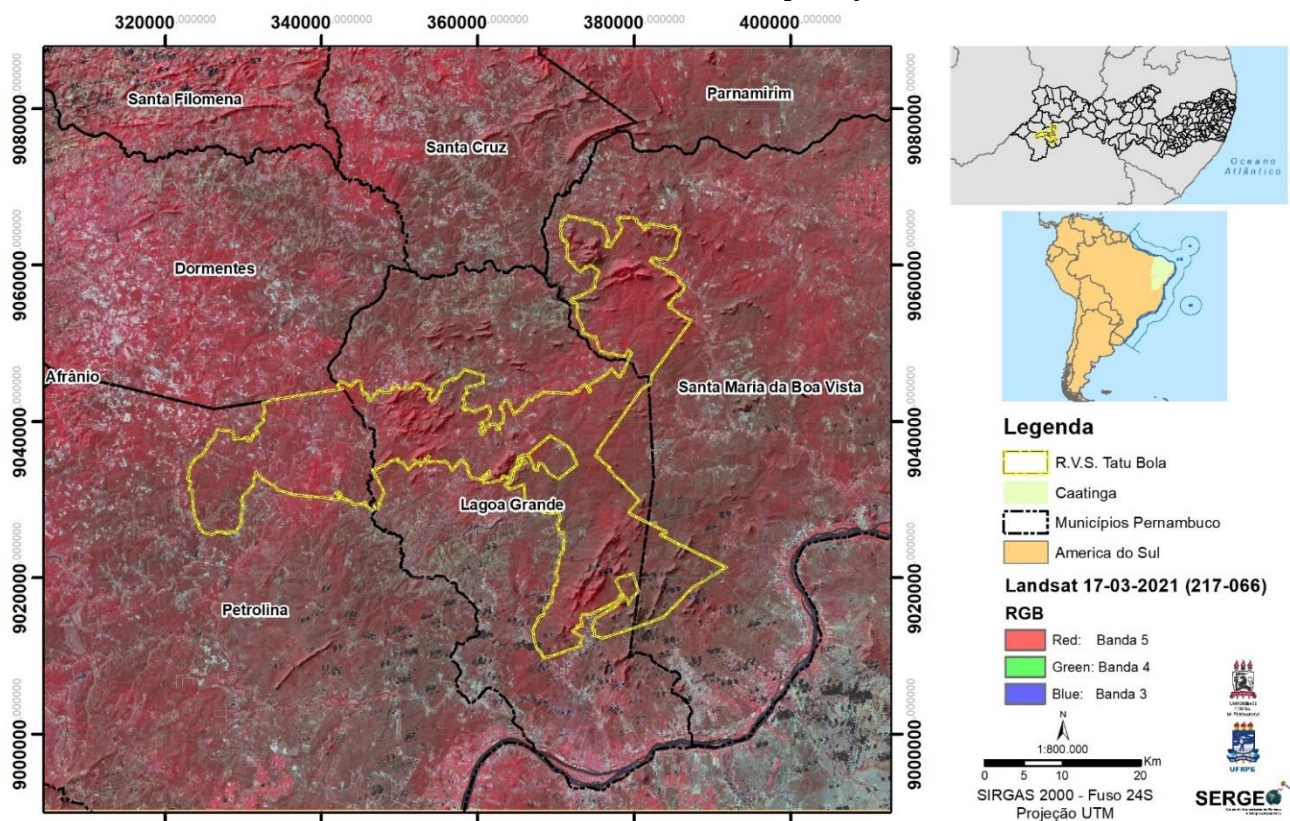


Figura 1 – Localização do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola, Pernambuco - Brasil. Fonte: Autores (2021).

Dados radiométricos

Foram utilizadas imagens dos sensores Thematic Mapper (TM) e Operational Land Imager (OLI) de órbita e ponto 217-066, a bordo dos satélites LANDSAT 5 e 8, respectivamente. As datas de passagem ocorreram em 23 de maio

de 1987, 15 de maio de 1996 e 01 de fevereiro de 2005 para o Landsat 5 e 28 de janeiro de 2015 e 17 de março de 2021 para o Landsat 8. As datas foram escolhidas considerando a menor quantidade possível de nuvem, o que inviabilizou a utilização de dezenas de cenas.

As imagens foram obtidas gratuitamente em sua segunda coleção e level um (L1TP), incluindo correção radiométrica, geométrica e correção de precisão, por meio de acesso ao sistema do EarthExplorer (Earth Explorer, 2021) da United States Geological Survey. A série Landsat teve início na década de 60, sendo dedicado, exclusivamente, para a observação de recursos naturais terrestres.

Em sua atual versão, o Landsat 8 apresenta os sensores OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor), operando nas faixas do visível, infravermelho próximo, médio, Cirrus e Costal, com resolução espacial de 30m e 15m na faixa pancromática. As bandas termais apresentavam resolução espacial de 100m no imageamento e de 30m nas reamostradas na distribuição (NASA, 2013).

Também foram utilizadas duas cenas da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM) a bordo do satélite CBERS-4A com datas de passagem em 23 de agosto de 2020 (órbita e ponto 198-124) e 18 de setembro de 2020 (órbita e ponto 199-124). Este sensor apresenta bandas com resolução espacial de 2m (banda pancromática) e 8m (visível e infravermelho próximo), com largura de faixa imageada de 92km e revisitada a cada 31 dias (INPE, 2021).

O satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) são satélites de sensoriamento remoto de média resolução criados em cooperação técnico científico espacial entre o Brasil e a China, voltados a suprir meios eficazes e econômicos de observar a Terra, sem a dependência de países desenvolvidos. A cooperação gerou o lançamento de seis satélites, sendo o CBERS-4A o mais atual em funcionamento.

Pré-processamento dos dados radiométricos

Após o download das imagens de satélite, as mesmas foram submetidas ao processo composição colorida (bandas 1 a 7 nas cenas do Landsat 5 e bandas 2 a 7 para o Landsat 8) e posteriormente suas coordenadas foram reprojatadas para o hemisfério sul, tendo em vista, que as cenas disponibilizadas pelo EarthExplorer vêm projetadas para o hemisfério norte. Após a reprojeção, as imagens passaram por processo de classificação supervisionada, onde os valores de números digitais referentes a regiões com nuvem

e sombra foram amostrados e posteriormente multiplicados por zero na classificação.

Assim posteriormente com o computo de índices de vegetação estas áreas apresentam um valor único, podendo facilmente ser isolado e retirado das imagens e dos cálculos estatísticos realizados pelo programa de geoprocessamento utilizado. Logo após as cenas foram recortadas para o limite adotado na pesquisa.

Cálculo da Reflectância

Após o pré-processamento, é necessário realizar a transformação dos números digitais (ND) em valores de radiância e reflectância para as cenas do sensor TM e reflectância para as cenas do sensor OLI.

A calibração radiométrica (Equação 1) consiste na conversão do nível de cinza de cada pixel e banda, em radiância monocromática, que representa a energia solar refletida, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. A radiância de cada pixel e banda do sensor TM do satélite Landsat 5 foi obtida pela equação proposta por Markham & Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (1)$$

onde a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), ND é a intensidade do pixel (valor inteiro entre 0 e 255) e i corresponde às bandas (1, 2, ... e 7) dos satélites Landsat 5. Os coeficientes de calibração utilizados para as imagens TM são os propostos por Chander & Markham (2003).

A reflectância (Equação 2 para o sensor TM e Equação 3 para o sensor OLI) de cada banda ($\rho_{\lambda i}$) é definida como a razão entre o fluxo de radiação solar refletido pela superfície e o fluxo de radiação solar global incidente, obtida por meio da equação (Allen et al., 2002):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

onde $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda, $K_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$), Z é o ângulo zenital solar e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_o) e a distância Terra-Sol (r), em dado dia do ano (DSA).

Para o cômputo da reflectância nas imagens do sensor OLI (Equação 3), é necessário utilizar os coeficientes de calibração radiométrica disponibilizados no arquivo de metadados (MTL) junto à imagem, conforme Silva et al. (2016).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{(\text{Add}_{\text{ref},i} + \text{Mult}_{\text{ref},i} \text{ND}_i)}{\cos Z \cdot d_r} \quad (3)$$

onde $\text{Add}_{\text{ref},b}$ e $\text{Mult}_{\text{ref},b}$ representa o fator aditivo e multiplicativo da reflectância para cada banda disponíveis no arquivo MTL (Grupo Level 1 Radiometric Rescaling). ND corresponde a intensidade do pixel (valor inteiro entre 0 e 255) e i corresponde às bandas (1, 2, ... e 7) dos satélites Landsat 8. O $\cos Z$ é o cosseno do ângulo zenital solar dado pela Equação 4 e d_r corresponde a correção da excentricidade da órbita terrestre, dado pela Equação 5:

$$\cos Z = \cos(90 - Z) \quad (4)$$

$$d_r = \left(\frac{1}{d_{\text{ES}}}\right)^2 \quad (5)$$

onde d_{ES} corresponde a distância terra sol (em unidade astronômica) para o dia da imagem, disponível no arquivo MTL.

Cálculo dos índices utilizados

O Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN), Equação 6, é obtido por meio da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo e do vermelho, e a soma das mesmas:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{IV}} - \rho_{\text{V}}}{\rho_{\text{IV}} + \rho_{\text{V}}} \quad (6)$$

onde ρ_{IV} e ρ_{V} correspondem, respectivamente, às bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM e às bandas 5 e 4 do Landsat 8 - OLI.

O IVDN atua como um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a +1, em que as superfícies vegetadas apresentam variação de valores positivos. Considerando os corpos hídricos e nuvens, o IVDN é apresentado em valores negativos.

O Normalized Difference Water Index ou NDWI, Equação 7, ou Índice de Umidade, proposto por Gao (1996), é obtido por meio da razão entre a diferença das refletividades do

infravermelho próximo (ρ_{IVP}) e do infravermelho médio (ρ_{IVM}), e a soma das mesmas:

$$\text{NDWI} = \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{IVM}}}{\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{IVM}}} \quad (7)$$

onde ρ_{IVP} e ρ_{IVM} correspondem, respectivamente, às bandas do infravermelho próximo e infravermelho médio, respectivamente às bandas 4 e 5 do Landsat 5 – TM e às bandas 5 e 6 do Landsat 8 - OLI. Segundo Cardozo et al. (2009), “[...]o índice de vegetação proposto por Gao (1996), é relacionado com o conteúdo de água presente nas folhas”, em que os valores negativos representam áreas com vegetação seca e valores positivos para vegetação verde. Conforme Gao (1996), o espalhamento do dossel aumenta a absorção de água. Como resultado, o NDWI é sensível às mudanças no conteúdo de água líquida das copas da vegetação. Os efeitos de espalhamento do aerossol atmosférico na região de 0,86-1,24 μm são fracos.

O Normalized Difference Built-up Index (NDBI), ou Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas, Equação 8, conforme Xu (2007) e proposto por Zha et al. (2003), é um índice radiométrico voltado para a identificação de áreas construídas e áreas urbanas. O grande incremento de resposta espectral entre as bandas do infravermelho próximo e médio para as áreas construídas são a base do índice.

$$\text{NDBI} = \frac{\rho_{\text{IVM}} - \rho_{\text{IVP}}}{\rho_{\text{IVM}} + \rho_{\text{IVP}}} \quad (8)$$

onde ρ_{IVM} e ρ_{IVP} correspondem, respectivamente, às bandas do infravermelho médio e infravermelho próximo, respectivamente às bandas 5 e 4 do Landsat 5 – TM e bandas 6 e 5 do Landsat 8 – OLI.

Após os procedimentos de cálculo dos índices, para cada data utilizada, foi realizada uma simples composição colorida das imagens índices, conforme França et al. (2012), onde o NDBI foi colocado no canal do vermelho, o NDVI no canal do verde e o NDWI no canal do azul.

Deste modo, é obtido um realce entre os principais usos, sendo possível melhor identificar os corpos hídricos e diferenciar as áreas de vegetação seca e solo exposto das áreas de vegetação sadia.

Fusão de imagens CBERS

Tendo em vista a diferença de resolução espacial para as imagens multiespectrais e pancromáticas do sensor WPM, foi aplicada a técnica de fusão por meio da ferramenta Image Analysis contida no programa ArcMap 10 (licenciado pela Prefeitura da Cidade do Recife).

Inicialmente foram realizados testes comparativos visuais entre a composição cor verdadeira (RGB 321) e falsa cor (RGB 432), optando pela utilização da última, na identificação de áreas com influência antrópica, sendo realizado o recorte de todas as bandas ao mesmo limite espacial utilizado nas imagens Landsat.

Em seguida, foi realizada a fusão da composição com a imagem pancromática por meio da ferramenta Create Pan Sharpened Raster Dataset, com indicação de cada banda, em seu respectivo canal (banda do azul no canal do azul, respectivamente até a banda do infravermelho no canal do infravermelho). Do mesmo modo, foi procedido com a banda pancromática.

Como método estatístico, foi utilizado o proposto pela ESRI. Assim [...] é utilizada uma média ponderada e a banda adicional do infravermelho próximo para criar suas bandas de saída pan-sharpened. Os pesos para as bandas multiespectrais dependem da sobreposição das curvas de sensibilidade espectral das bandas multiespectrais com a banda pancromática. O resultado da média ponderada é usado para criar um valor de ajuste (ADJ) que é então usado no cálculo dos valores de saída (ESRI, 2021).

Deste modo, foi possível combinar a banda de melhor resolução espacial (2m) com as bandas multiespectrais de menor resolução espacial (8m). Tendo em vista que o limite utilizado está contido em duas orbitas diferentes do CBERS, em cada uma das cenas foi utilizada a extensão máxima possível e ao final da fusão foi realizado o mosaico.

Dados de precipitação mensal

Os valores de precipitação mensal utilizados neste estudo foram os medidos e disponibilizados pela estação agrometeorológica

do Campo Experimental de Bebedouro, Petrolina - PE, coordenadas de localização (09°09'S; 40°22'O). Eles foram obtidos por meio de acesso ao site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), em tabela com valores de precipitação mensal (mm) histórica para o período de 1963 a 2020.

Dados vetoriais e Modelo Digital de Elevação

Os dados vetoriais utilizados neste estudo fazem parte do banco de dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo utilizados os limites de unidades da federação (2010), municípios (2019), limites de países da América (2016) e biomas (2019).

Considerando o Modelo Digital de Elevação (MDE), foram utilizados dados da missão SRTM (cenas SC-24-V-A, SC-24-V-B, SC-24-V-C e SC-24-V-D) obtidos na página Brasil em Relevo da EMBRAPA, onde foi realizado o mosaico e gerado o hillshade. Ao final, nos mapas, foi aplicada uma transparência de 30% em cada imagem para obter o aspecto do relevo.

Resultados e discussão

A Figura 2 mostra a evolução espaço-temporal do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), com perceptível diminuição de valores de índice superiores a 0,40 entre os anos investigados.

Nota-se como a imagem do ano de 2015 se apresenta diferente daquelas dos demais anos, com predominância de valores de NDVI inferiores a 0,40, o que pode ser explicado pelo fato do mês de janeiro de 2015 ter apresentado baixo valor de precipitação mensal, com 9,4mm, bem abaixo da média histórica mensal, com valor de 75,6mm (Tabela 1).

O ano de 2015 também está classificado como um ano com ocorrência de El niño forte, o que para a região nordeste do Brasil se apresenta na forma de secas severas (INPE, 2020). Esta imagem também foi a que apresentou uma maior quantidade de nuvens para as datas analisadas nesta pesquisa.

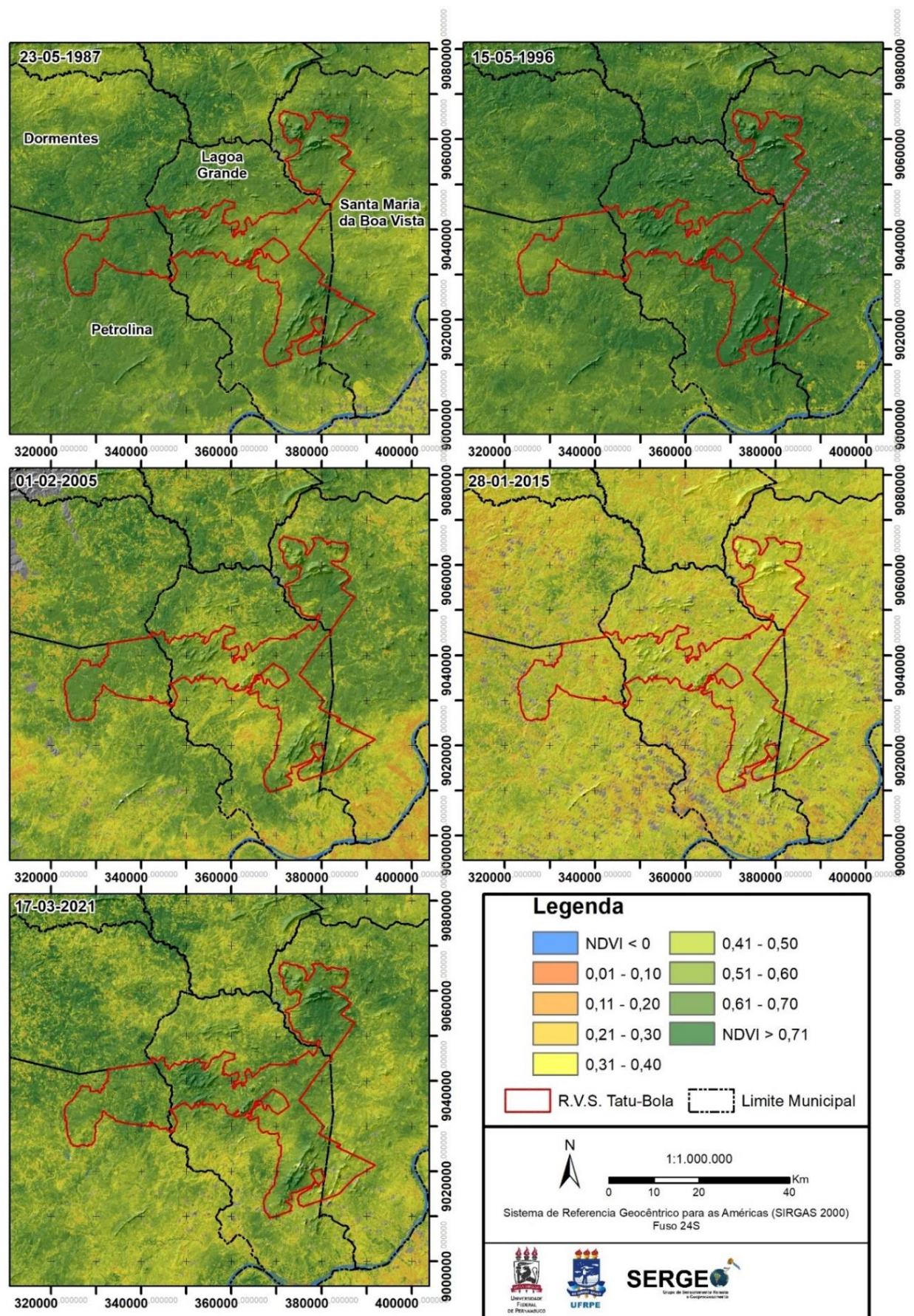


Figura 2 – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada para o Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola e entorno, Pernambuco – Brasil para as datas investigadas. Fonte: Autores (2021).

Tabela 1 – Valores de precipitação mensal para os quatro meses anteriores (em itálico) ao mês de imageamento (em negrito) e média histórica mensal de precipitação (mm) dos anos de 1963 e 2020 para a Estação Agrometeorológica de Bebedouro – Petrolina. Fonte: EMBRAPA (2021). Organizado pelos autores, 2021.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1987	27,10	36,00	140,60	28,20	14,60	1,60	9,10	0,00	8,80	28,80	3,10	9,60
1996	41,90	50,10	93,30	87,50	25,50	17,10	4,10	10,2	0,00	0,00	98,80	33,00
2004	451,30	214,10	56,00	16,70	5,30	2,80	5,00	0,00	0,80	8,80	24,70	1,20
2005	78,40	80,10	165,90	31,90	55,80	40,00	2,60	6,20	0,00	0,00	35,40	28,80
2014	8,40	31,30	6,20	55,60	4,80	1,00	6,80	3,90	1,50	0,30	65,30	31,20
2015	9,40	45,72	44,95	91,94	42,16	0,76	11,94	0,51	0,26	1,52	0,51	18,54
2020	189,20	57,80	174,40	49,70	27,00	22,50	9,40	2,00	0,00	0,60	53,30	7,20
2021	45,90	116,60	15,20	59,20								
Média Histórica Mensal(mm)	75,62	81,87	111,79	76,98	20,41	10,70	7,43	3,93	4,28	10,47	40,80	65,84

A Figura 3 mostra os valores acumulados anuais de precipitação (mm) para o período de 1963 a 2020, onde é observado que a última década da série apresentou redução no acumulado da precipitação. Apenas o ano de 2020, desta década, apresentou valores acumulado de precipitação superior à média histórica de 505,6mm.

Durante períodos mais úmidos a vegetação apresenta maiores valores de produtividade, o que acarreta valores de índices de vegetação mais elevados. Huxman et al. (2004) afirma que “variações na densidade da vegetação estão atreladas a dinâmica climática do período de obtenção da imagem.”

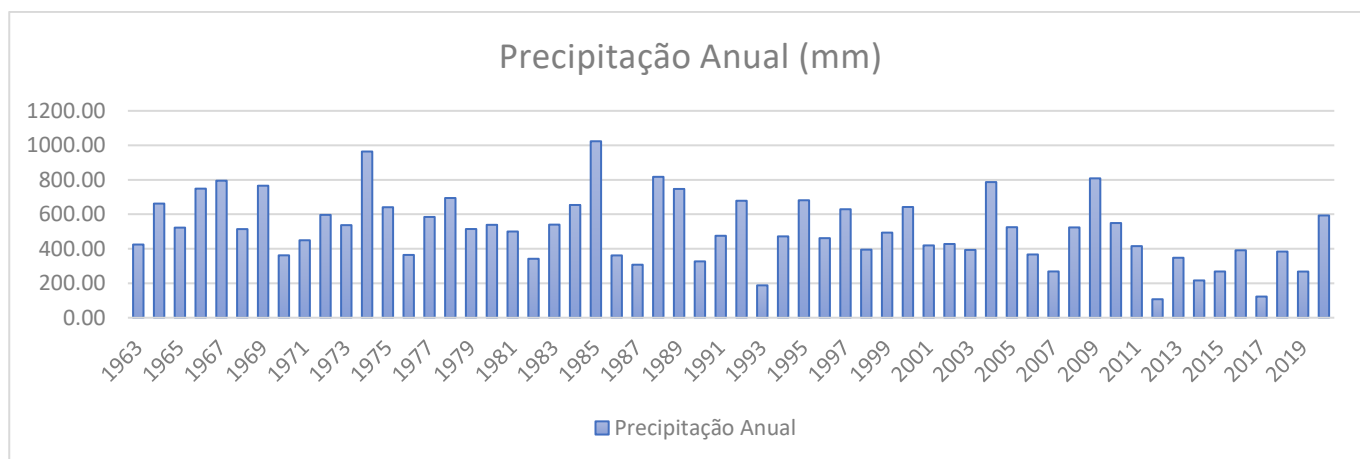


Figura 3 – Precipitação anual (mm) da Estação Meteorológica Bebedouro – Petrolina, entre os anos de 1963 e 2020. Fonte: EMBRAPA, 2021. Organizado pelos autores.

Ribeiro et al. (2010) afirmam que os diferentes ciclos de chuva e secas na Caatinga influenciam nos valores de biomassa e, consequentemente, na maior ou menor disponibilidade dos recursos florestais.

Alterações provocadas por atividades antrópicas (como o desmatamento desordenado) no processo de variabilidade ambiental natural podem resultar em desequilíbrios ambientais e influenciar mudanças na troca de energia e matéria (Christofolletti, 1999).

Becerra et al. (2015) buscam responder “como o padrão de precipitação anual influencia

a sazonalidade da vegetação” indica a existência de relação direta entre “o volume de precipitação, no período chuvoso, com o volume de fitomassa, gerado no ciclo de crescimento da vegetação”. Os autores utilizaram séries temporais dos índices de vegetação NDVI e LSWI, e dados de precipitação do satélite TRMM e estações de superfície para o período de 2001 a 2008. “A utilização de métricas de sazonalidade da precipitação e vegetação permitiu a identificação e caracterizar dos ciclos sazonais e a variabilidade interanual da precipitação e vegetação vindo a mostrar maior

defasagem nas regiões climatológicas com maior precipitação” (Becerra et al., 2015).

Por sua vez, as mudanças no padrão de cobertura vegetal podem influenciar o regime de distribuição de chuva, assim como na maior ou menor absorção e fixação de carbono atmosférico. É perceptível como a distribuição espacial de NDVI com valores inferiores a 0,30 foram aumentando, temporalmente, estando associada a regiões com menor cobertura vegetal ou com vegetação seca.

Regiões localizadas entre o entorno do Rio São Francisco e o limite do refúgio de Vida Silvestre, mais ao sul, apresentaram valores de NDVI inferiores a 0,30, a partir da imagem do ano de 2005. Atualmente, estas áreas são mais utilizadas antropicamente, com a presença de várias estradas de terra e demarcações lineares. Algumas estão indicadas como propriedades

rurais e áreas de assentamentos rurais do INCRA, conforme Pernambuco (2014), podendo ser melhor observado por meio das imagens fusionadas do sensor CBERS-4A (Figura 4A). Áreas com solo exposto e áreas rochosas exibiram valores classificados entre 0,01 e 0,10. As áreas urbanas também apresentaram valores positivos mais baixos de NDVI.

As áreas de agricultura irrigada apresentaram os maiores valores de NDVI, exibindo valores superiores a 0,60, estando grande parte determinados para as áreas mais próximas às margens do Rio São Francisco (Figura 4B), enquanto as áreas com vegetação de caatinga variavam com valores entre 0,31 e 0,60 e superiores a 0,61 em áreas com maior densidade. Nota-se como as áreas de agricultura irrigada aumentaram espacialmente entre os anos de 1987 e 2021.

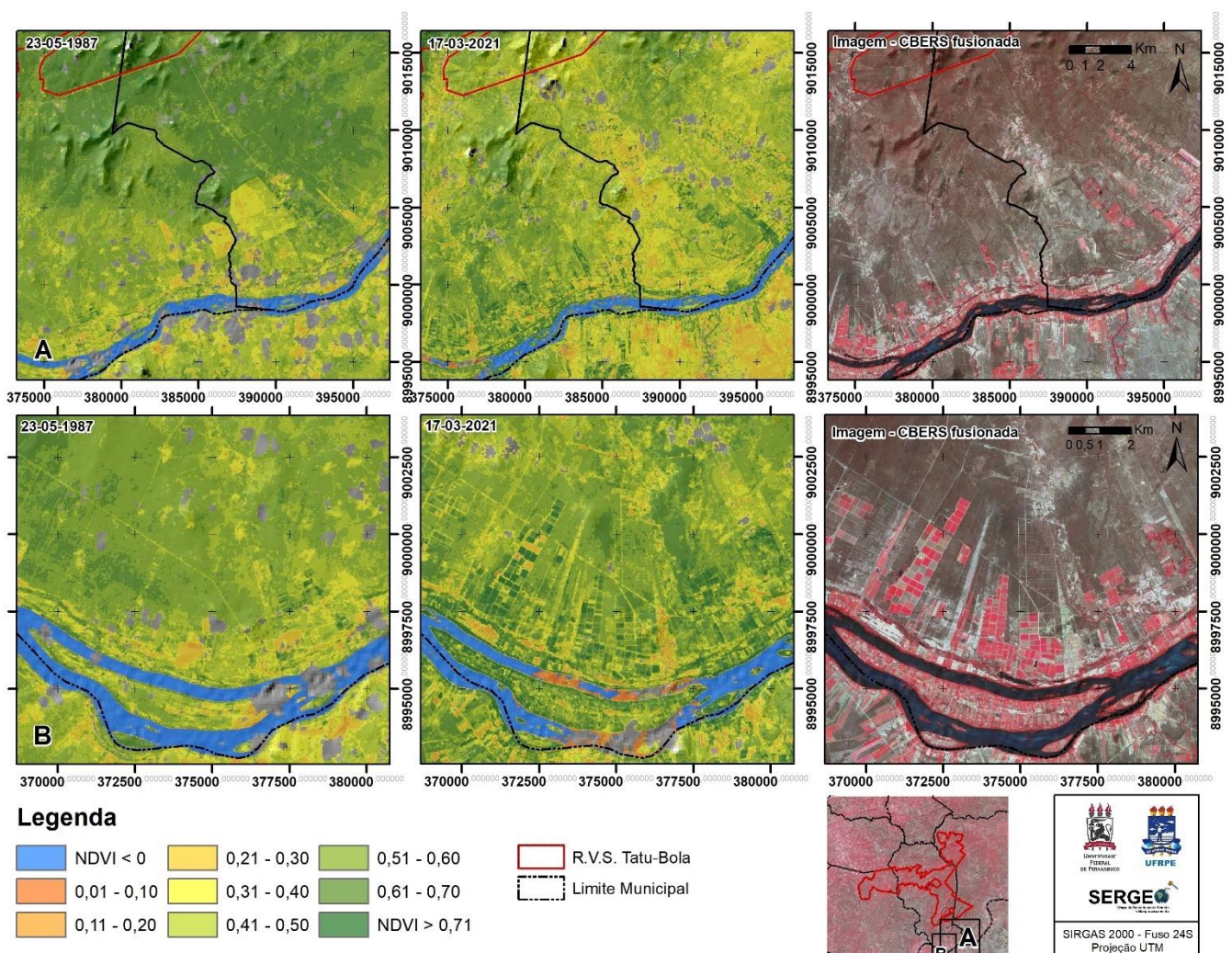


Figura 4 –Evolução do uso no entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola (A) e áreas de agricultura irrigada (B) no entorno do Rio São Francisco, Petrolina - Pernambuco. Fonte: Autores (2021).

Estes resultados também corroboram aqueles encontrados por Bezerra et al. (2012), em estudo realizado no Parque Nacional de Fumaça, nos municípios de Mossoró e Baraúna – RN, onde obtiveram os menores valores de NDVI para os solos e afloramentos rochosos, valores intermediários representados pela vegetação da Caatinga, com vegetação rasteira esparsa e os valores mais altos associados à vegetação da Caatinga mais densa e com porte arbóreo localizada em áreas com maior altitude e declive.

Barbosa et al. (2019) afirmam que “enquanto as plantas da Caatinga são as primeiras a serem afetadas pela seca, as plantas com raízes profundas e as plantas irrigadas são mais resistentes e permanecem verdes durante períodos consideráveis de seca”. Francisco et al. (2012), objetivando “mapear a vegetação da caatinga, e selecionar um índice de vegetação (NDVI, SAVI e EVI) usando o IBVL para validação dos resultados e detectar mudanças ocorridas” concluíram que o NDVI foi o índice que melhor correlacionou a vegetação de Caatinga durante o período seco, encontrando valores superiores a 0,35 para a Caatinga arbórea muito densa, com valores variando entre 0,32 e 0,35 para a arbórea densa, e entre 0,30 e 0,32 para a subarbórea densa. Em áreas de solo exposto, encontraram valores variando entre 0 e 0,15.

Brito et al. (2017), objetivando “analisar as diferenças de parâmetros biofísicos em áreas de caatinga preservada e degradada, bem como das áreas de agricultura irrigada e sequeiro utilizando imagens do sensor OLI – Landsat”, encontraram os valores de NDVI mais elevados nas áreas de agricultura irrigada, exibindo valores superiores a 0,6. Em áreas de Caatinga foi encontrada uma predominância de valores classificados entre 0,4 e 0,6.

Oliveira e Costa (2020), em estudo objetivando “caracterizar as formas e os usos e cobertura da terra na Serra João do Vale (RN/PB) por meio de mapeamentos multitemporal, e avaliar os índices de vegetação mais empregados no semiárido (NDVI e SAVI)”, encontraram valores de NDVI variando entre 0,42 a 0,58 para áreas de Caatinga arbustiva e entre 0,58 e 0,66 para áreas de Caatinga arbórea. As áreas com rochas, solo exposto e edificações variaram entre 0,22 e 0,42. Os autores ainda observaram o avanço da devastação em fisionomias vegetais, principalmente florestal, o abandono de áreas

agrícolas e posterior rebrota de fisionomias em sucessão ecológica.

A Figura 5 mostra que é possível visualizar a distribuição de NDVI para os usos no entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola para a imagem de janeiro de 2015, período anterior à criação do refúgio, e março de 2021. Na Figura 5A é possível observar o limite oeste do Refúgio no município de Petrolina e, na Figura 5B, o limite norte do Refúgio no município de Santa Maria da Boa Vista.

Nota-se como o entorno do refúgio nestas áreas apresentam uma maior quantidade de áreas com valores de NDVI inferiores a 0,30, podendo ser observado, por meio da imagem fusionada, um maior número de propriedades ou partes de propriedades com supressão de vegetação e/ou vegetação rasteira, principalmente na parte oeste do refúgio (Figura 5A).

Analisando o interior do refúgio, na parte oeste, também foram visualizadas áreas com o mesmo padrão de uso e cobertura observado no entorno (Figura 5A). A parte norte do refúgio (Figura 5B) apresentou valores de NDVI superiores a 0,61 e menor fragmentação para a imagem de março de 2021. Como citado anteriormente, a imagem de janeiro de 2015 apresenta um padrão de valores diferenciados, quando comparados às demais imagens, podendo ser observado que as áreas de Caatinga apresentaram um padrão de valores de NDVI classificado entre 0,41 e 0,60.

Barbosa et al. (2019), em estudo analisando os padrões espaço-temporais do impacto da seca na vegetação da Caatinga entre os anos de 2008 e 2016, por meio da utilização de dados meteorológicos diários combinados ao SERIVI NDVI, afirmam que “apesar de suas características tipicamente xerofíticas, as plantas da Caatinga respondem mais fortemente à chuva, o que foi indicado por correlações positivas significativas com melhores defasagens entre 1 e 3 meses”.

Rebello et al. (2020), objetivando avaliar a resposta de longo prazo do NDVI em imagens MODIS, em duas regiões administrativas do Brasil, Nordeste (NE) e Sudeste (SE), encontraram impacto da seca nos valores de NDVI entre os anos de 2012 e 2015. Este período de seca foi precedido por um período úmido entre os anos de 2008 e 2011, afetando ambas as regiões estudadas.

Os autores ainda afirmam que “ambas as regiões têm vegetação contrastante tipos e condições climáticas, sendo o primeiro em um semiárido e o segundo em um clima úmido, mas

o sinal de série temporal único derivado de EOF revelou que a diminuição de NDVI é a maior e mais longa observado, considerando todo o registro histórico do satélite MODIS”.

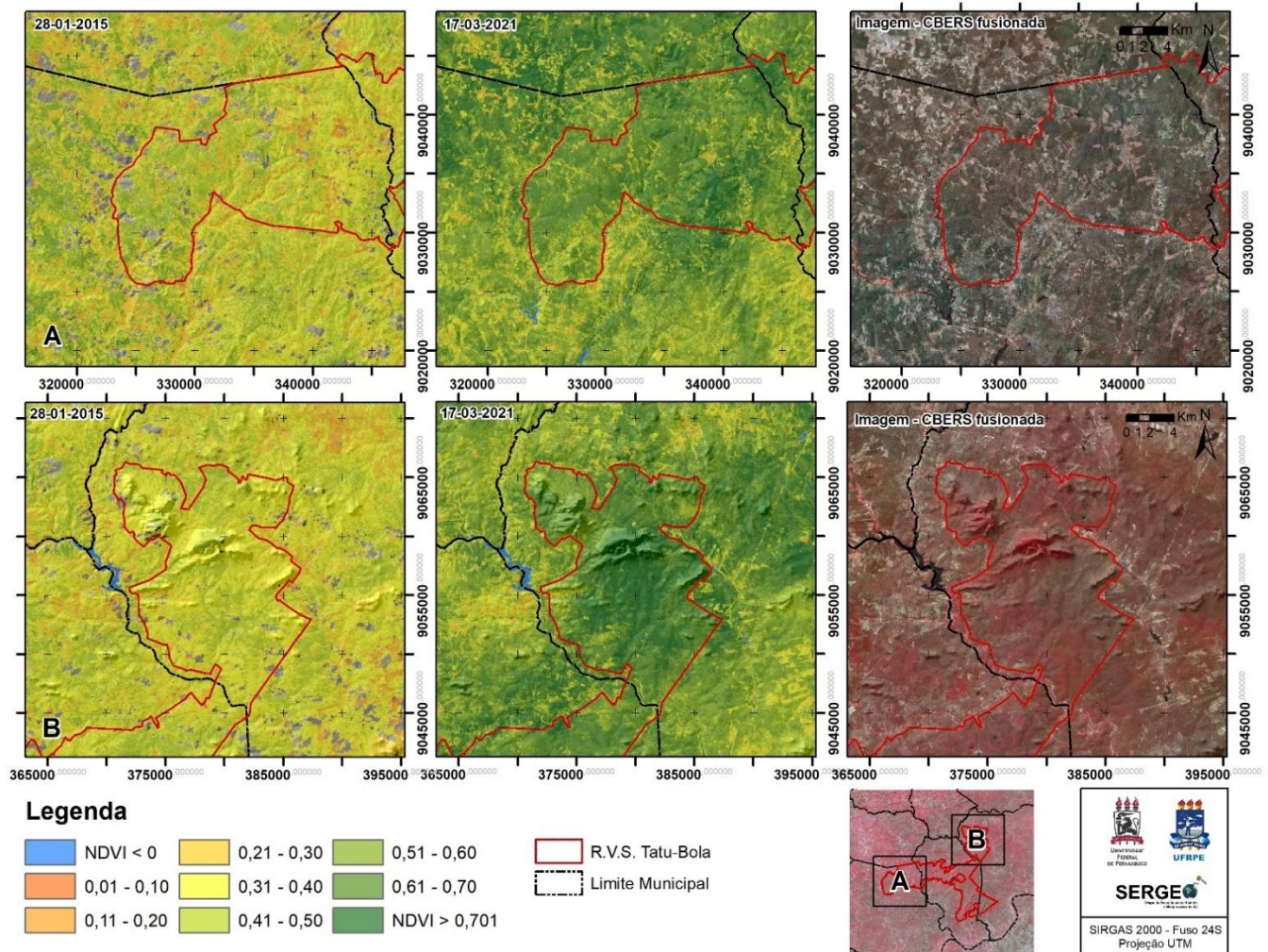


Figura 5 – Uso no entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola para janeiro de 2015 e março de 2021. Limite oeste do Refúgio no município de Petrolina (A) e limite norte do Refúgio no município de Santa Maria da Boa Vista (B). Fonte: Autores (2021).

A Figura 6 mostra a evolução espaço-temporal dos valores de umidade foliar (NDWI) para as datas em estudo. Conforme Gao (1996), o NDWI é sensível às mudanças no conteúdo de água líquida das copas da vegetação, se apresentado como um índice complementar ao NDVI. No geral, os valores negativos estão associados às áreas sem vegetação, ao solo exposto e aos afloramentos rochosos, enquanto os valores positivos estão associados às áreas com vegetação verde e corpos hídricos.

É possível visualizar uma inversão na predominância de valores entre as imagens do período de 1987 e 2005 e as imagens do período

de 2015 e 2021. No primeiro período é observada uma predominância de valores de NDWI superiores a 0,16 na maior parte da imagem, com intensificação espacial de valores inferiores a - 0,07 no ano de 2005.

Para o segundo período, é perceptível o destaque na imagem do ano de 2015, com predominância de valores inferiores a 0,10. Como citado anteriormente, este ano é classificado como um ano com El Niño forte, com precipitações anuais abaixo da média histórica nos anos anteriores. Na imagem do ano de 2021, é perceptível como os valores de NDWI superiores a 0,16 diminuem espacialmente.

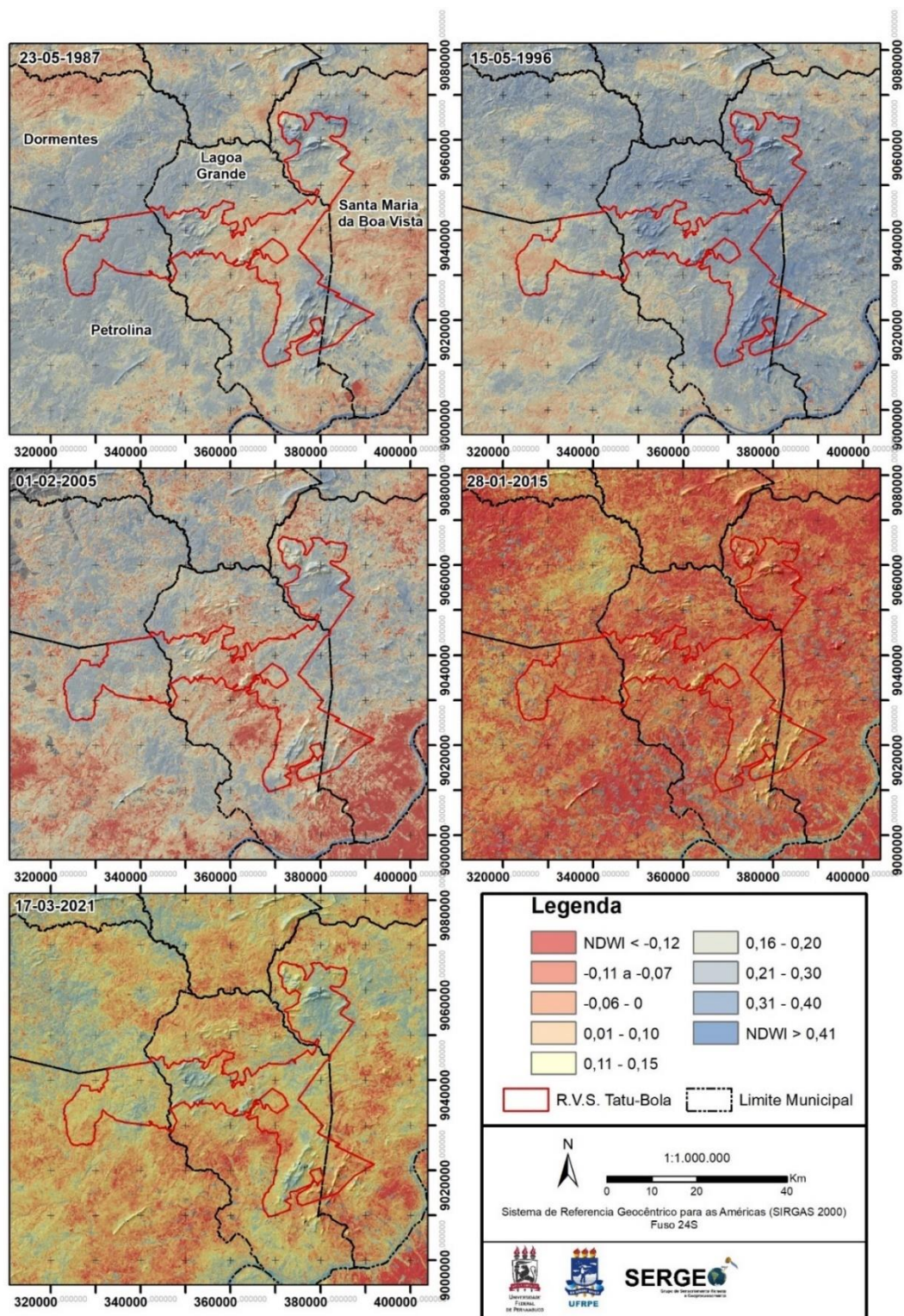


Figura 6 – Índice de Umidade para o Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola e entorno, Pernambuco – Brasil para as datas utilizadas. Fonte: Autores (2021).

As áreas que apresentavam valores de NDVI classificados com valores superiores a 0,51 apresentam valores de NDWI classificados com valores superiores a 0,16. As áreas com maior presença de solo exposto apresentaram valores de NDWI inferiores a -0,07.

As áreas mais elevadas localizadas no interior do Refúgio e as áreas de vegetação riparia ou ciliar apresentaram valores mais elevados de NDWI, exibindo valores superiores a 0,21 em todas as imagens utilizadas neste estudo, exceto o ano de 2015.

Para o interior do refúgio, é perceptível como uma boa parte apresenta valores mais baixos de NDWI para a imagem do ano de 2021. As imagens de 1987, 2005 e 2021 apresentaram grandes áreas com valores de NDWI inferiores a 0,15 na parte mais central do refúgio, no município de Lagoa Grande. Em todas as imagens, a área mais ao norte do município de Santa Maria da Boa Vista apresentou valores de NDWI inferiores a 0,15, com maior intensificação de NDWI negativo nas últimas duas imagens utilizadas.

A Figura 7 mostra a evolução do Índice de Umidade para o entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola (A) e áreas de agricultura irrigada (B) no entorno do Rio São Francisco, Petrolina – Pernambuco. É notável como as áreas com vegetação de Caatinga apresentaram valores de NDWI superiores a 0,16 no ano de 1987,

enquanto áreas de solo exposto apresentaram valores negativos para o entorno do refúgio (Figura 7A). Os corpos hídricos apresentaram os maiores valores de NDWI, exibindo valores superiores a 0,41.

Na imagem de 2021, é notável constatar a diminuição nos valores de NDWI destas áreas, com predominância de NDWI inferiores a -0,07. As áreas de vegetação verde apresentaram os maiores valores de NDWI em poucos fragmentos e em áreas mais próximas ao rio São Francisco para este ano. Na área de entorno do rio São Francisco (Figura 7B) é visualizado como as áreas de agricultura irrigada apresentam maiores valores de NDWI, estando destacadas na imagem com valores superiores a 0,20. As áreas de vegetação de Caatinga apresentam predominância de valores abaixo de 0,15.

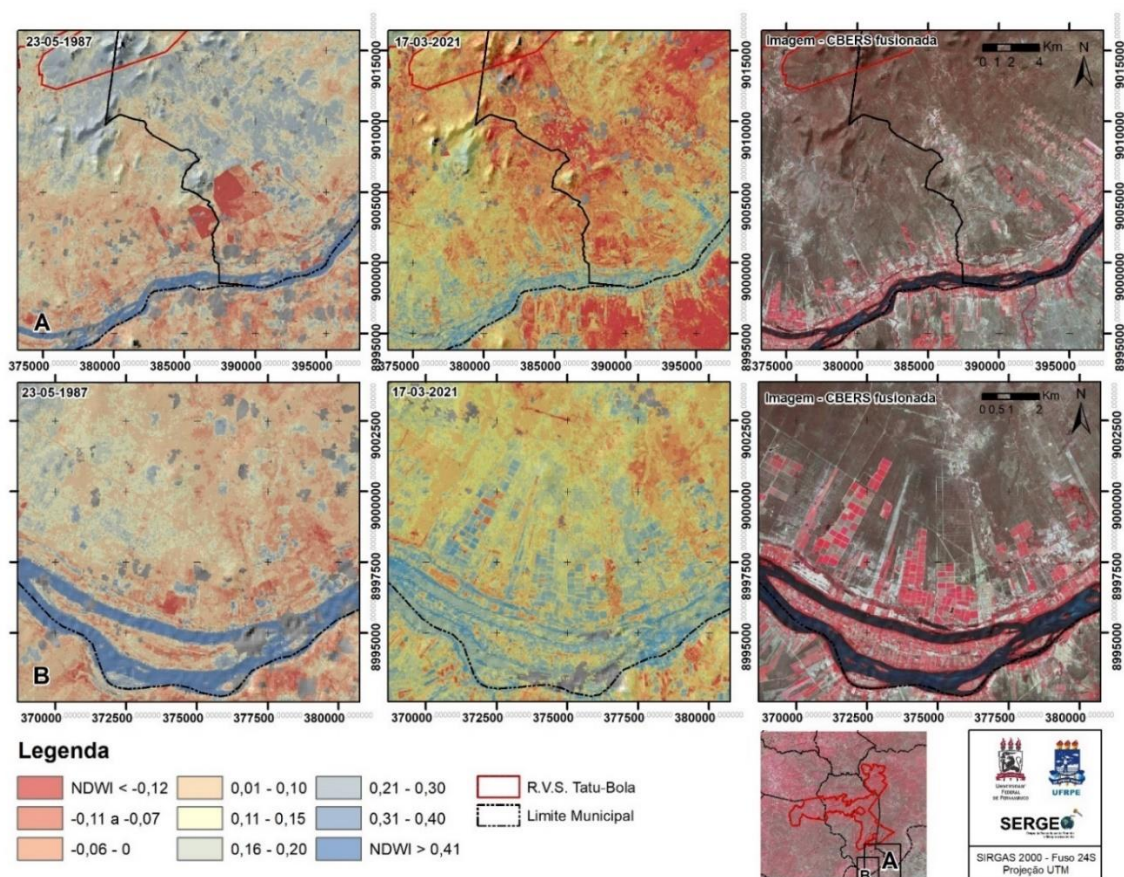


Figura 7 – Evolução do Índice de Umidade para o entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola (A) e áreas de agricultura irrigada (B) no entorno do Rio São Francisco, Petrolina – Pernambuco.

Bilar et al. (2018), utilizando índices de vegetação para auxiliar no monitoramento ambiental voltado para a gestão do Parque Estadual da Pimenteira, em Pernambuco, utilizando imagens dos anos de 2007, 2013 e

2016, encontraram valores positivos de NDWI em áreas com presença de vegetação verde. As áreas com valores de NDWI menores que -0,016, mais a noroeste da zona de amortecimento do Parque da Pimenteira, se caracterizavam como áreas com

ausência de folhas, para o ano de 2007, caracterizados pelos autores com baixos valores de precipitação nos meses anteriores ao imageamento.

Pereira et al. (2020), em estudo objetivando “analisar o uso e a cobertura do solo e entender a influência do relevo nas respostas dos índices de vegetação NDWI e o SAVI na Área de Proteção Ambiental das Onças/PB”, encontraram que áreas com maior grau de degradação indicaram menores valores de NDWI, enquanto áreas com maior presença de biomassa apresentaram maiores valores.

Analisando o Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas (NDBI), na Figura 8 é possível observar que ele apresenta os valores positivos associados às áreas de solo exposto, com vegetação seca e áreas urbanas. Os valores negativos são associados às áreas de vegetação. As áreas de solo exposto apresentaram valores de NDBI superiores a 0,10.

As áreas de vegetação esparsa apresentaram variação de valores entre as classes de -0,04 e 0,10. É perceptível como as áreas de vegetação, com valores de NDVI superiores a 0,40 e NDWI superiores a 0,20, apresentaram valores de NDBI inferiores a -0,05. Mathew et al. (2015), em estudo visando construir dados espaciais de temperatura da superfície terrestre, índices de vegetação e construção voltados à análise da relação entre as características espaciais e o ambiente térmico, encontraram que as áreas com cobertura de vegetação mais alta em áreas rurais mostram valores relativamente mais baixos de NDBI.

Trindade et al. (2019), objetivando identificar a área impermeável, por meio do NDBI, e a área de vegetação densa, por meio do NDVI, do município de Santarém - Pará, verificaram que os valores de NDBI abaixo de -0,25 estavam associados às áreas com vegetação. As áreas urbanas apresentaram variação entre 0 e 0,5. As áreas de corpos hídricos apresentaram valores acima de 0,5, porém os autores apresentam a ressalva da ocorrência de confusão com área urbana, com valores mais baixos que 0,5.

Nota-se como a área do refúgio no município de Petrolina e na parte mais central no município de Lagoa Grande apresentam valores de NDBI superiores a -0,04 para a imagem mais atual, áreas estas caracterizadas como aquelas

com maior uso antrópico. As áreas mais elevadas no interior do refúgio mantiveram valores mais baixos de NDBI, com valores inferiores a -0,25, exceto na imagem do ano de 2015, com valores inferiores a 0. Também foi perceptível como as áreas com maior presença de solo exposto se intensificaram em valores de NDBI nas últimas três imagens.

Conforme Malik et al. (2019), existe uma forte correlação linear negativa entre o NDVI e o NDBI, podendo ser utilizado o NDVI para caracterizar a evolução ou expansão das áreas construídas.

A Figura 9 mostra a evolução dos valores de NDBI no entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola (Figura 9A) e em áreas de agricultura irrigada (Figura 9B) no entorno do Rio São Francisco, Petrolina – Pernambuco. As áreas de corpos hídricos, com vegetação riparia e áreas de agricultura irrigada apresentaram os menores valores de NDBI, exibindo valores inferiores a -0,35. As áreas com vegetação de Caatinga, com menor quantidade de água quando comparada à agricultura irrigada, apresentou variação de valores entre -0,05 e -0,34.

Também foi observado um aumento na quantidade de solo exposto para a área de entorno do refúgio entre as imagens do ano de 1987 e 2021 (Figura 9A) e diminuição para a área do entorno do rio São Francisco (Figura 9B). Esta diminuição no entorno do rio se deve à ocupação destas áreas com agricultura irrigada.

A composição colorida entre o NDBI, NDVI e NDWI (Figura 10) auxiliou na identificação das áreas de solo exposto, destacado com tons de vermelho, corpos hídricos destacados em tom de azul e a vegetação apresentada em tom de verde. Realizando a comparação entre os valores de NDBI e a composição é perceptível como os valores de NDBI inferiores a -0,25 indicam a vegetação com maior densidade, apresentando tom de verde mais escuro, enquanto as áreas com vegetação mais esparsa, o NDBI variou entre -0,24 e 0, oscilando entre o verde e o vermelho na composição.

Deste modo, a utilização da composição colorida entre os índices ajudou na definição das classes dos três índices, individualmente, assim como na identificação de pequenas perturbações causadas principalmente por pequenas clareiras e áreas de solo exposto no meio de áreas de Caatinga.

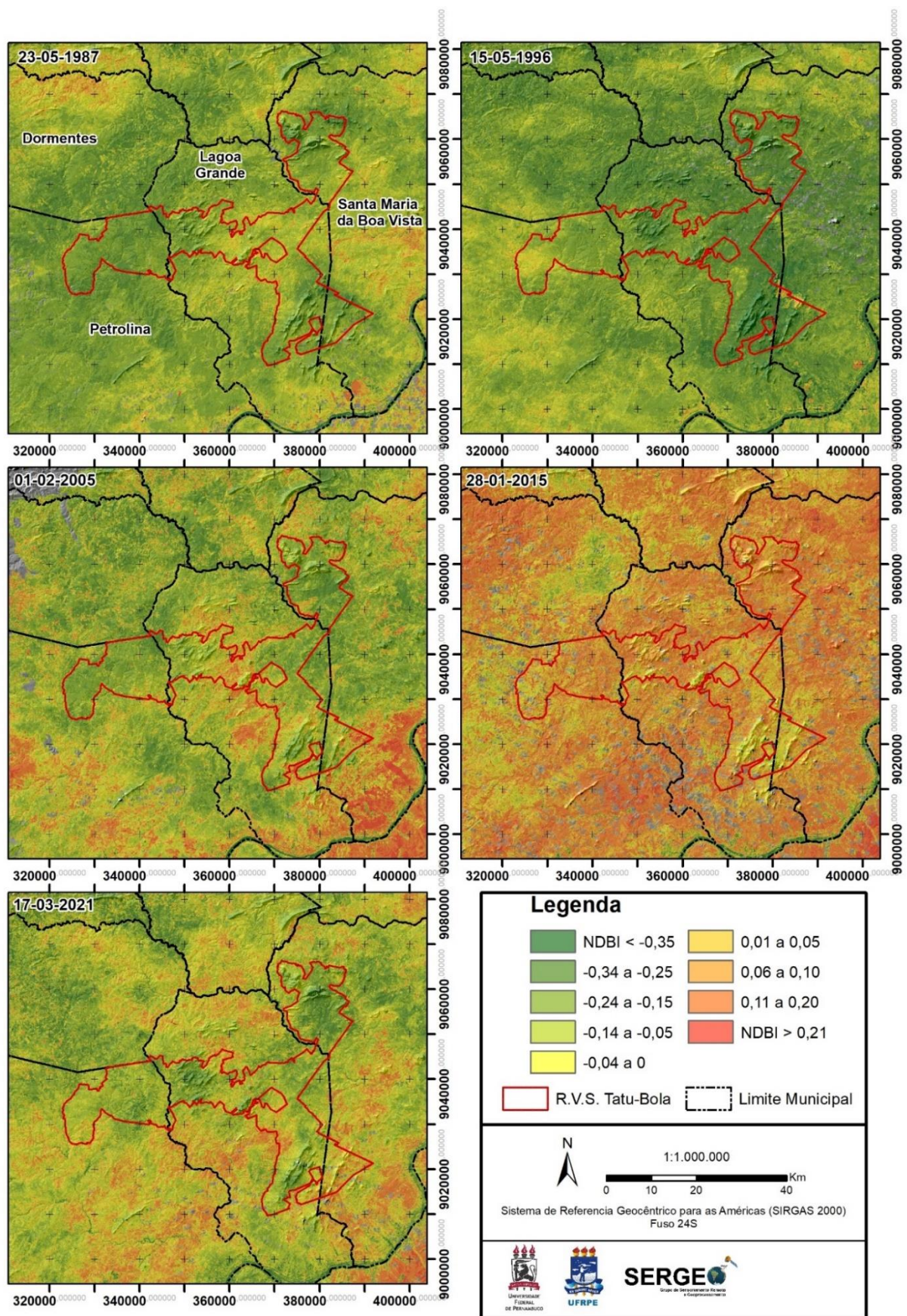


Figura 8 – Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas para o Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola e entorno, Pernambuco – Brasil para as datas selecionadas para estudo. Fonte: Autores (2021).

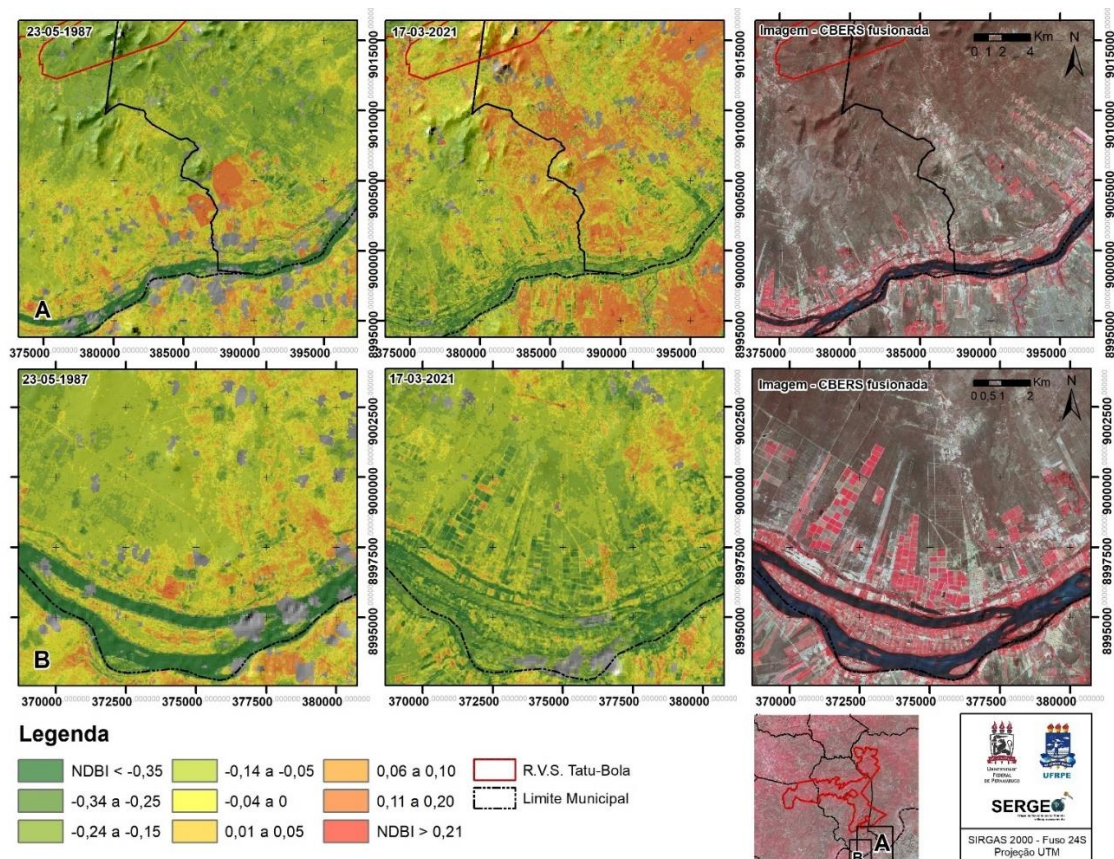


Figura 9 –Evolução do NDBI no entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola (A) e áreas de agricultura irrigada (B) no entorno do Rio São Francisco, Petrolina - Pernambuco. Fonte: Autores (2021).

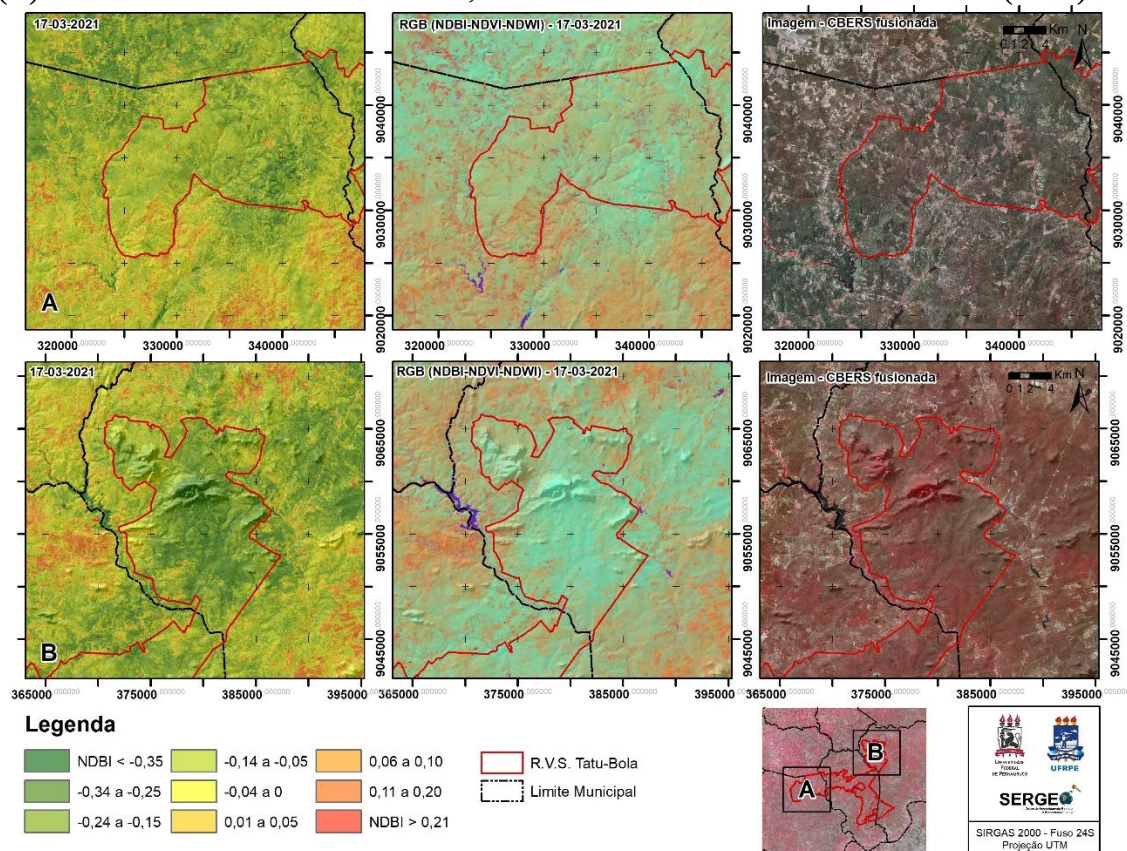


Figura 10 – Uso no entorno do Refúgio de Vida Silvestre Tatu Bola para março de 2021 com o NDBI, composição colorida e imagem CBERS fusionada. Limite oeste do Refúgio no município de Petrolina (A) e limite norte do Refúgio no município de Santa Maria da Boa Vista (B). Fonte: Autores (2021).

4. Conclusões

Entre os anos de 1987 e 2021 foi possível identificar uma diminuição de cobertura vegetal, principalmente em áreas no entorno da RVS Tatu-bola e um aumento de área, com valores de NDVI inferiores a 0,40.

A área do Refúgio no município de Petrolina apresenta uma maior quantidade de área desmatada. A utilização de composição RGB dos índices, assim como as imagens fusionadas do satélite CBERS-4A, com resolução de espacial de 2 m, apresentam melhora significativa para a identificação de áreas de solo exposto e com vegetação seca.

Do mesmo modo, a utilização da composição colorida entre os índices de vegetação NDBI, NDVI e NDWI apresentou bons resultados na identificação de áreas utilizadas antropicamente.

A disponibilização de imagens com melhores resoluções espaciais e espectrais de todo o território nacional, como as do satélite CBERS, de maneira gratuita, proporciona para a sociedade e gestores uma fonte de informações confiáveis. Torna-se imprescindível o investimento em novas versões de satélites com imagens de alta resolução espacial com disponibilização gratuita.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFPE e UFRPE pela infraestrutura, ao CNPq por bolsa de Doutorado da 2ª autora e bolsa de Produtividade em Pesquisa Nível 2 para a 4ª autora.

Referências

Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). 2002. Advance Training and User's Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 97p. Disponível: ftp://ftp.funceme.br/Cospar_Funceme_2010/CLASS_DAY_04.11.2010/LAB/quixere/quixere/Final%20Sebal%20Manual.pdf. Acesso: Dezembro de 2010.

Antongiovanni, M.; Venticinque, E. M.; Fonseca, C. R. 2018. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. *Landscape Ecology*, 33, 1353-1367. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0672-6>

Barbosa, H. A.; Kumar, L.; Paredes, F.; Elliott, S.; Ayuga, J. G. 2019. Assessment of Caatinga

response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 148, P. 235-252.

Barlow, J.; Lennox, G. D.; Ferreira, J.; Berenguer, E.; Lees, A. C.; Nally, R. M.; Gardner, T. A. 2016. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*. v. 535, p. 144–147.

Becerra, J. A. B.Ç Carvalho, S.Ç Ometto, J. P. H. B. 2015. Relação das sazonalidades da precipitação e da vegetação no bioma Caatinga: abordagem multitemporal. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil, INPE.

Bezerra, J. M.; Vasconcelos, R. S.; Moura, G. B. A.; Sobrinho, J. E. 2012. Spectral indices of vegetation to caatinga of the area of semi-arid of Rio Grande of Norte, Brazil. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 02, 010-024

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

Brito, P. V. P. S.; Morais, Y. C. B.; Ferreira, H. S.; Silva, J. F.; Galvêncio, J. D. 2017. Análise comparativa da umidade da vegetação de áreas de caatinga preservada, agricultura irrigada e sequeiro. *Journal of Environmental Analysis and Progress* V. 02 N. 03, 493-498.

Cardozo, F. S.; Pereira, G.; Silva, G. B. S. S.; Silva, F. B.; Shimabukuro, Y. E.; Moraes, E. C. 2009. Discriminação de áreas alagadas no Pantanal sul matogrossense a partir de imagens orbitais. In: 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Anais, Corumbá, 7-11 novembro, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, pp. 99-106.

Chander, G.; Markham, B. 2003. Revised LANDSAT-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. v. 41. n. 11. Disponível: <http://LANDSATHandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/L5TMLUTIEEE2003.pdf>. Acesso: 14 de fevereiro de 2008.

Chen, X.; Zhao, H.; Li, P.; Yin, Z. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and

- land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment* 104, 133–146.
- Chiarello, A.G.; Aguiar, L.M.S.; Cerqueira, R.; Melo, F.R.; Rodrigues, F.H.G.; Silva, V.M.F. 2008. Mamíferos Ameaçados de Extinção no Brasil. In: Machado, A.B.M.; Drummond, G.M.; Paglia, A.P. (Eds.). *Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção. Volume II*. MMA, p.680-880
- Christofoletti, A. 1999. Modelagem de sistemas ambientais. Edgard Blucher: São Paulo.
- Defries, R.S.; Hansen, M.; Townshend, J.R.G.; Sohlberg, R. 1998. Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from LANDSAT imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, p. 3141-3168.
- EarthExplorer. 2018. Landsat 5 e 8. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 1 de junho de 2018.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). 2021. Estações Agrometeorológicas Automáticas – Estação Bebedouro – Petrolina. Dados de 1963 a 2021. Disponível em: <http://www.cpatia.embrapa.br:8080/index.php?op=eabeb>. Acesso em: 17 de setembro de 2021.
- Francisco, P. R. M.; Chaves, I. B.; Chaves, L. H. G.; Lima, E. R. V. 2012. Detecção de Mudança da Vegetação de Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física* 06, 1473-1487.
- França, A. F.; Tavares Junior, J. R.; Moreira Filho, J. C. C. 2012. Índices NDVI, NDWI e NDBI como ferramentas ao mapeamento temático do entorno da lagoa olho d'água, em Jaboatão dos Guararapes-PE. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, p. 001 - 009.
- Gao, B. 1996. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of Environment*, 58, 257-266.
- Gardner, T. A.; Barlow, J.; Araujo, I. S.; Avila-Pires, T. C.; Bonaldo, A. B.; Costa, J. E.; Esposito, M. C.; Ferreira, L. V.; Hawes, J.; Hernandez, M. I. M.; Hoogmoed, M. S.; Leite, R. N.; Lo-Man-Hung, N. F.; Malcolm, J. R.; Martins, M. B.; Mestre, L. A. M.; Miranda-Santos, R.; Overall, W. L.; Parry, L.; Peters, S. L.; Ribeiro-Junior, M. A.; Da Silva, M. N. F.; Da Silva Motta, C.; Peres, C.A. 2008. The cost-effectiveness of biodiversity surveys in tropical forests. *Ecology Letters*, v. 11, p. 139-150.
- Giulietti, A.M. et al. 2004. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. In: SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T.; LINS, L.V. (orgs.). *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação*. pp. 48-90. Ministério do Meio Ambiente, Brasília.
- Huxman, T. E.; Smith, M. D.; Fay, P. A.; Knapp, A. K.; Shaw, R.; Loik, M. E.; Smith, S. D.; Tissue, D. T.; Zak, J. C.; Weltzin, J. F.; Pockman, W. T.; Sala, O. E.; Haddad, B. M.; Harte, J.; Koch, G. W.; Schwinning, S.; Small, E. E.; Williams, D. G. 2004. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*. v. 429, n. 6992, p. 651-654.
- Machado, A. B. M.; Drummond, G. M.; Paglia, A. P. 2008. Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção. 1. ed. Brasília: MMA; Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas. v. 2. (Biodiversidade, 19). Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/biodiversidade/fauna-brasileira/livro-vermelho/volumeII/Mamiferos.pdf>>. Acesso em: 05 julho. 2021.
- ICMBio - Instituto Chico Mendes para a Conservação da Biodiversidade. 2014. Sumário executivo do Plano de Ação Nacional para a Conservação do Tatu-Bola. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/pan-tatu-bola/sumario-tatu-bola-2014.pdf>>. Acesso em: 01 agosto. 2021.
- Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE). 2020. Anos de ocorrência do fenômeno El niño e La niña. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/#>. Acesso em: dezembro de 2020.
- Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE). Sobre o CBERS. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/sobre/index.php>. Acesso em: 04 de setembro de 2021
- Lacerda, A. C.; Albuquerque, J. V.; Galvinctio, J. D. 2017. Área legalmente protegida sob conflito: o caso da Reserva de Vida Silvestre

- Tatu-Bola, Estado de Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*: 4(7): 191-202.
- Leal, I. R.; Silva, J. M. C.; Tabarelli, M.; Junior, T. E. L. 2005. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. *MEGADIVERSIDADE*, Volume 1, Nº 1.
- Lei Estadual Nº 13.787. PERNAMBUCO. Lei nº 13.787 de 08 de junho de 2009. Institui o Sistema Estadual de Unidades de Conservação – SEUC.
- Malik, M. S.; Shukla, J. P.; Mishra, S. 2019. Relationship of LST, NDBI and NDVI using Landsat-8 data in Kandaihimmat Watershed, Hoshangabad, India. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, Vol. 48 (01), pp. 25-31.
- Marinho-Filho, J.; Guimarães, M.M.; Reis, M.L.; Rodrigues, F.H.G.; Torres, O.; Almeida, G. 1997. The Discovery of the brazilian threebanded armadillo in the Cerrado of Central Brazil. *Edentata*, 3(1). p.11-13.
- Markham, B. L.; Barker, L. L. 1987. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.3, p.517-523. Disponível: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431168708948658#.VaPYjvmkGkw>. Acesso: 24 de junho de 2008. DOI: 10.1080/01431168708948658
- Mathew, A.; Chaudhary, R.; Gupta, N. 2015. Study of Urban heat Island Effect on Ahmedabad City and Its Relationship with Urbanization and Vegetation Parameters. *International Journal of Computer & Mathematical Sciences*. V. 4, P. 126 – 135.
- Ministério Do Meio Ambiente (Brasil). 2019. Caatinga. Brasil, [20]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biomas/caatinga.html>. Acesso em: 8 de janeiro de 2019.
- Miranda, R. Q.; Galvncio, J. D.; Moraes, Y. C. B.; Moura, M. S. B. Jones, C. A.; Srinivasan, R. Dry forest deforestation dynamics in Brazil's pontal BA. *Rev. Caatinga*, Mossoró, v. 31, n. 2, p. 385 – 395, abr. – jun., 2018
- Moraes, Y. C.; Araujo, M. S. B.; Moura, M. S. B.; Galvncio, J. D.; Miranda, R. Q. 2017. Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. *Rev. bras. meteorol.* 32 (4). <https://doi.org/10.1590/0102-7786324007>
- Muposhi, V. K.; Chademana, T. C.; Gandiwa, E.; Muboko, N. 2016. Edge effects: impact of anthropogenic activities on vegetation structure and diversity in western Umfurudzi Park, Zimbabwe. *Afr Journal Ecology* 54:450–459
- National Aeronautics And Space Administration (NASA). 2013. Landsat 8. Disponível em: http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/spacecraft/index.html#.UieDrzY3s0M>. Acesso em: 04 ago 2013.
- Oliveira, A. M.; Costa, D. F. S. 2020. Mapping of Caatinga ecosystems: evaluation of the effectiveness of Vegetation Indexes (NDVI and SAVI) and object-oriented mapping. *RA'EGA*, Curitiba, PR, V.8, n.2. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v49i0.6645>
- Oliveira Filho, A. T.; Jarenkov, J. A.; Rodal, M. J. N. Floristic relationships of seasonally dry forests of eastern South America based on tree species distribution pattern. In: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. 2006. Neotropical savannas and seasonally dry forests. Boca Raton (EUA): CRC Press, p. 159-190
- Oliveira, J. A.; Gonçalves, P. R.; Bonvicino, C. R. 2003. Mamíferos da Caatinga. In: Leal, I.R.; Tabarelli, M.; Silva, J. M. C. (eds.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. pp. 275-333. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Oliveira, T. H.; Machado, C. C. C.; Silva, J. S.; Galvncio, J. D.; Pimentel, R. M. M.; Silva, B. B. 2010. Índice de Umidade (NDWI) e Análise Espaço-Temporal do Albedo da Superfície da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física* Vol. 03. P. 55-69. Disponível: <http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewArticle/130>. Acesso: 01 de dezembro de 2010.
- Oliveira, T. H.; Candeias, A. L. B.; Galvncio, J. D.; Pimentel, R. M. M. 2016. Evolução do uso e ocupação do solo do município do Recife através de imagens dos satélites LANDSAT e CBERS 4. *Anais do VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*. CTG – UFPE, Recife - PE.
- Pereira, J. A. V.; Souza, Y. G.; Correia, I. M. G.; Souza, B. I. 2020. Uso e cobertura do solo e comparação entre os índices de vegetação

- SAVI e NDWI na área de proteção ambiental das Onças, Paraíba, Brasil. *Revista de Geografia (Recife)* V. 37, No. 2.
- Pennington, R. T.; Prado, D. A.; Pendry, C. 2000. Neotropical seasonally dry forests and Pleistocene vegetation changes. *J. Biogeogr.*, v. 27, p. 261-273.
- PERNAMBUCO. 2014. Proposta para discussão da Criação do Refúgio de Vida Silvestre Tatu-bola na Região do Sertão do São Francisco – Pernambuco. Secretaria de Meio ambiente e Sustentabilidade. Recife. 78p.
- Rebello, V. P. A.; Getirana, A.; Filho, O. C. R.; Lakshmi, V. 2020. Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 18.
- Reis, N. R.; Peracchi, A. L.; Pedro, W. A.; Lima, I. P. 2006. *Mamíferos do Brasil*. Londrina. 437p.
- Ribeiro E, Arroyo-Rodríguez V, Santos B. A., Tabarelli M, Leal I. R. 2015. Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. *J Appl Ecol* 52:611–620.
- Ribeiro, S.C.; Marçal, M.S.; Correa, A.C.B. 2010. Geomorfologia de áreas semiáridas: uma contribuição ao estudo dos Sertões Nordestinos. *Revista de Geografia*. Recife-UFPE. V.27, p.120-137.
- Rodrigues, M.T. 2003. Herpetofauna da Caatinga. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (eds.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. pp. 181-236. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Rosa, R. S.; Menezes, N. A.; Britski, H. A.; Costa, W. J. E. M.; Groth, F. 2003. Diversidade, padrões de distribuição e conservação dos peixes da Caatinga. In: Leal, I. R.; Tabarelli, M.; Silva, J. M. C. (eds.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. pp. 135-180. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Santos, J. C.; Leal, I. R.; Almeida-Cortez, J. S.; Fernandes, G. W.; Tabarelli, M. 2011. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. *Tropical Conservation Science*, Menlo Park, v. 4, n. 3, p. 276-286.
- Silva, J. M. C.; Souza, M. A.; Bieber, A. G. D.; Carlos, C.J. 2003. Aves da Caatinga: status, uso do habitat e sensibilidade. In: Leal, I. R.; Tabarelli, M.; Silva, J. M. C. (eds.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. pp. 237-273. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Silva, B. B.; Braga, A. C.; Oliveira, L. M. M.; Montenegro, S. M. G. L.; Barbosa, B. J. 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1): 3- 8.
- Souza, B. I.; Artigas, R. C.; Lima, E. R. V. 2015. *Caatinga e Desertificação*. Mercator, Fortaleza, v. 14, n. 1, p. 131-150..
- Trindade, A. R.; Dutra, V. A. B.; Tavares, P. A.; Souto, J. I. O.; Beltrao, N. E. S.; Ribeiro, H. M. C. 2019. Aplicação de índices de vegetação para identificação de área construída e vegetação densa em áreas urbanas na Amazônia. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- Veloso, H. P.; Rangel-Filho, A. L. R.; Lima, J. C. A. 1991. *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. Rio de Janeiro (RJ): IBGE. 124p
- Vasconcelos Sobrinho, J. 2002. *Desertificação no Nordeste do Brasil*. Recife: Editora Universitária.
- USGS (2016). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*, 2015, LSDS-1574, version 1.0. Sioux Falls, USA: USGS EROS. Disponível em <<https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>> Acesso em 05 de setembro de 2008.
- Xu, H. 2007. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using a Thematic-oriented Index Combination Technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 73, No. 12, December, p. 1381–1391.
- Zanella, F. C. V.; Martins, C. F. 2003. Abelhas da Caatinga: biogeografia, ecologia e conservação. In: Leal, I. R.; Tabarelli, M.; Silva, J. M. C. (eds.). *Ecologia e conservação da Caatinga*. pp. 75-134. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

- Zeng, H.; Peltola, H.; Vaisanen, H.; Kellomaki, S. 2009. The effects of fragmentation on the susceptibility of a boreal forest ecosystem to wind damage. *Forest Ecology and Management*, v. 257, p. 1165-1173.
- Zha, Y.; Gao, J.; Ni, S. 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3):583-594.