

Imagens Sentinel-2/MSI e metodologia GEOBIA no mapeamento do uso e cobertura da terra em área de Floresta Tropical Sazonalmente Seca no Brasil

Sentinel-2/MSI images and GEOBIA methodology in mapping land use and land cover in a Seasonally Dry Tropical Forest area in Brazil

Janaína Silva de Oliveira ^{*}, Eduardo Rodrigues Viana de Lima ^{**}, Bartolomeu Israel de Souza ^{***}, Vinícius da Silva Seabra ^{****}, Mikaella Pereira dos Santos ^{*****}

^{*} Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, jsobio@yahoo.com.br

^{**} Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, eduvianalima@gmail.com

^{***} Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, bartolomeuisrael@gmail.com

^{****} Departamento de Geografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, vinigeobr@yahoo.com.br

^{*****} Departamento de Geografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, pmikaella2@gmail.com

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v59i0.90615>

Resumo

A Caatinga é uma Floresta Tropical Sazonalmente Seca endêmica do Brasil que recobre cerca de 10% do território nacional. Caracterizada por um mosaico de vegetação com predominância de espécies caducifólias adaptadas aos eventos irregulares de chuva e ao clima semiárido, a degradação do bioma é historicamente negligenciada pela ciência e pelas políticas públicas. Mesmo com o avanço das geotecnologias, as particularidades da Caatinga tornam o mapeamento de uso e cobertura da terra por sensoriamento remoto uma atividade de elevada complexidade quando comparado aos ambientes úmidos. O objetivo do presente trabalho foi distinguir áreas de vegetação exótica composta predominantemente pela algaroba (*Prosopis juliflora*) na Caatinga do Cariri Paraibano através de técnicas de sensoriamento remoto e analisar o uso e cobertura da terra na região. Com o uso do sensor MSI do Satélite Sentinel-2 e da metodologia *Geographic Object-Based Image Analysis* (GEOBIA), os resultados demonstraram a eficiência na identificação de alvos espectralmente difíceis de serem individualizados, aqui representados pela distinção entre a vegetação nativa (densa/rarefeita) e a algaroba, permitiram identificar o padrão de distribuição dessa espécie invasora e analisar o uso e a ocupação da região de estudo, com destaque para áreas de conservação da biodiversidade e geodiversidade local. Com os resultados inovadores obtidos, conclui-se que o uso da GEOBIA é um facilitador na distinção de alvos espectralmente difíceis de serem individualizados e pode ser amplamente utilizado no monitoramento da vegetação em FTSS por sensoriamento remoto.

Palavras-chave:

Caatinga, degradação ambiental, conservação ambiental.

Abstract

Caatinga is an endemic Seasonally Dry Tropical Forest in Brazil that covers about 10% of the national territory. Characterized by a mosaic of vegetation with predominance of deciduous species adapted to the irregular rainfall and a semi-arid climate, the degradation of that biome has been historically neglected by science and public policies. Despite the advance of geo-technology, such features make mapping of land use and land cover through remote sense a high-complexity task when compared to humid environments. The purpose of this study was to differentiate areas with predominance of exotic woods (*Prosopis juliflora*) from Caatinga's area of Cariri in Paraíba state, Brazil, through remote sense techniques and analyze the occupation of the studied area. By using the MSI sensor of Sentinel-2 Satellite and the Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) methodology, the results showed the efficiency in the identification of targets spectrally difficult to individualize, herein represented by the distinction between areas occupied by alien species and native vegetation (dense/rarefied), allowed identify a pattern of distribution of the areas invaded by *P. juliflora* and analyzing the occupation of the studied region, with focus on the conservation of biodiversity and geodiversity local areas. By the innovative results obtained, it's concluded that GEOBIA was a facilitator in distinguishing targets that are spectrally difficult to be individualized and can be widely used in vegetation monitoring in FTSS by remote sensing.

Keywords:

Caatinga, environmental degradation, environmental conservation.

I. INTRODUÇÃO

As Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) apresentam elevados níveis de endemismo e fornecem importantes serviços ecológicos para a sociedade. Porém, a relevância ecológica, social e econômica, bem como os esforços na detecção de mudanças da cobertura vegetal e na conservação desses ambientes são historicamente negligenciados, principalmente quando comparados às florestas tropicais úmidas (SANTOS et al.; 2011; BEUCHLE et al.; 2015; SMITH et al., 2019; LOPES et al. 2020).

Santos et al. (2011), Beuchle et al. (2015), Marinho et al. (2016), Silveira et al. (2018) e Lopes et al. (2020) destacam a Caatinga como a maior FTSS da América do Sul, caracterizada por mosaicos de vegetação herbácea, arbustiva e arbórea com dominância de espécies xerófitas e decíduas. Trata-se de um bioma heterogêneo e endêmico do Brasil, que corresponde a aproximadamente 10% do território nacional e onde predomina o clima semiárido. Contudo, o intenso uso da terra e a falta de proteção ameaçam a região semiárida descrita como a mais populosa e com maior biodiversidade do mundo.

De acordo com Marinho et al. (2016), a pressão antrópica nesse bioma ocorre principalmente pela pecuária e desmatamento. Muitos animais são criados livremente e se alimentam da vegetação nativa, que também vem sendo substituída pela agricultura, pastagem e extrativismo indiscriminado. Com uso de técnicas tradicionais e baixos níveis de produção, Santos et al. (2011), Souza et al. (2015) e Lopes et al. (2020) alertam que a conversão da cobertura vegetal pode desencadear o processo de desertificação, que por alterar as propriedades físicas, químicas, biológicas e econômicas do solo, tem seu uso comprometido. Conforme os autores, estima-se que quase 20% da Caatinga estejam sob forte processo de desertificação, sendo o terceiro bioma mais degradado do Brasil e um dos mais ameaçados dos trópicos.

A degradação ainda está relacionada com a invasão biológica de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. (Fabaceae), popularmente conhecida como algaroba. A disseminação da espécie no semiárido nordestino ocorre pela sua capacidade de sobrevivência em áreas com baixa pluviosidade, incluindo períodos de longa estiagem. Mesmo apresentando uma tendência de concentração nos domínios de matas ciliares e em solos mais profundos, pouco se sabe sobre a quantificação e distribuição dessa espécie no semiárido. Acredita-se que a algaroba ocorra em aproximadamente um milhão de hectares, mas a área pode ser ainda maior pela fácil dispersão das sementes, realizada principalmente por animais de pastoreio (ANDRADE et al., 2010; GONÇALVES et al., 2015).

Ademais, a Caatinga também apresenta desafios excepcionais relacionados ao mapeamento e monitoramento do uso e cobertura da terra por sensoriamento remoto. A dificuldade consiste nas especificidades da dinâmica ambiental (SILVEIRA et al., 2018), representadas por baixos índices no sinal da vegetação e pela elevada reflectância do solo, presença de biocrostras, alta heterogeneidade espacial em escala regional e comportamento imprevisível da vegetação mediante a irregularidade temporal e espacial das chuvas (SMITH et al., 2019).

Apesar do avanço tecnológico do sensoriamento remoto nas últimas décadas, os mapeamentos que estimam, em larga escala, a cobertura vegetal por imagens de satélite com média e alta resolução espacial são relativamente recentes no bioma – muitos ainda limitados em dados históricos da série Landsat (BEUCHLE et al., 2015; SILVEIRA et al., 2018; LOPES et al., 2020). Segundo Silveira et al. (2018), estudos atuais na Caatinga desperdiçam novas oportunidades das geotecnologias para minimizar a complexidade no mapeamento da Caatinga, tais como a utilização de uma melhor resolução espacial e espectral proporcionada pelo sensor MSI do satélite Sentinel-2, lançado em 2015.

O processamento digital das imagens de satélite também progrediu nas últimas décadas, com o aperfeiçoamento das técnicas de classificação. Para Santos et al. (2018), a classificação orientada a objeto tem

apresentado melhores resultados de desempenho em mapeamentos recentes de uso e cobertura da terra. Mediante as especificidades da Caatinga e as dificuldades técnicas encontradas no sensoriamento remoto, o *Geographic Object-Based Image Analysis* (GEOBIA) é uma metodologia de classificação que permite sistematizar e reproduzir o conhecimento do especialista através de critérios booleanos e/ou de modelagem matemática fuzzy. Nessa classificação supervisionada, os descritores são usados como parâmetros caracterizadores de objetos capazes de integrar dados de múltiplas fontes, escalas e variáveis, como cor, textura, localização, contexto e relação semântica entre classes ou objetos. Assim, o GEOBIA torna-se um facilitador na distinção de alvos espectralmente difíceis de serem individualizados (SANTOS et al., 2018; SILVA; CRUZ, 2018; LIMA et al., 2019).

O presente trabalho visou identificar e diferenciar as áreas de algaroba em relação aos remanescentes de Caatinga durante a classificação. Adicionalmente, o mapa de uso e cobertura da terra permitiu verificar a ocupação da área de estudo, que abriga geodiversidade e biodiversidade peculiares em crescente ameaça promovida pela pressão antrópica, sobretudo da agropecuária e do extrativismo vegetal.

A área de estudo, com 9.207,71 km², abrange 21 municípios do Cariri Paraibano¹ e está parcialmente inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs, 2019), essa área apresenta os menores índices de precipitação do Brasil, com média entre 400 e 800 mm por ano, em um clima semiárido do tipo BSh conforme classificação Köppen. Apesar dos baixos índices pluviométricos, Seabra et al. (2014) e Lima et al. (2019) destacam a importância da bacia no abastecimento da população paraibana. Em termos de gestão de recursos hídricos, os autores destacam a posição estratégica do Rio Paraíba que, em parte do ano, recebe águas advindas da transposição do Rio São Francisco (LIMA et al., 2019).

Conforme Censo 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a área de estudo abriga população de 146.194 habitantes, grande parte composta por pequenos produtores que sobrevivem da pecuária e agricultura. De acordo com o último censo agropecuário do IBGE realizado em 2017, os produtos predominantes das lavouras são palma forrageira (*Opuntia cochenillifera*, utilizada como base alimentar de rebanhos), milho (*Zea mays*) e feijão (*Vigna sp* e *Phaseolus sp.*). Já na pecuária é comum a utilização de pastagens naturais, com destaque para a quantidade de animais: 235.947 cabeças de caprinos, 161.212 de ovinos e 72.141 de bovinos.

¹ Apesar de Boa Vista estar localizada na microrregião Agreste, tradicionalmente é referido como pertencente ao Cariri.

A falta de alternativas econômicas intensifica a degradação ambiental, sobretudo no período de déficit hídrico. Durante as secas prolongadas há maior extrativismo vegetal, seja para uso doméstico de famílias do meio rural, seja para indústrias, na qual a lenha e o carvão representam a principal matriz energética (Lima et al., 2019). Com as modificações antrópicas de áreas naturais, Santos et al. (2011) e Souza et al. (2015) destacam o surgimento de biotas próprias de um ambiente em processo de desertificação, encontrado em níveis elevados no Cariri, ainda que contrapondo a potencialidade do estado em representar a riqueza florística da Caatinga.

Na tentativa de ordenar a exploração sustentável dos recursos naturais e garantir o equilíbrio ecológico, a legislação brasileira prevê a criação de Unidades de Conservação (UCs) para proteger ambientes com características relevantes (BRASIL, 2000). Porém, Lima et al. (2019) destacam que apenas 7,7% das UCs abarcam áreas de Caatinga; e a natureza abiótica, muitas vezes representada como atrativo turístico pela beleza cênica, é tratada de forma secundária, sem efetiva proteção legal da geodiversidade (DIAS e FERREIRA, 2018). Nesse sentido, apesar da lacuna na legislação ambiental, o marco inicial para geoconservação na área de estudo está embasado em propostas de criação de um Geoparque com onze Geossítios e nove Sítios da Geodiversidade, identificados pelo Serviço Geológico do Brasil (LAGES et al., 2018). Em termos de UCs, há duas Áreas de Proteção Ambiental (APAs) e duas Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs).

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Caatinga, a escolha das imagens de satélite é uma etapa diferenciada no mapeamento, sendo preciso analisar o comportamento temporal e espacial da precipitação pluviométrica na área de estudo para não subestimar ou superestimar a vegetação devido a rápida variação da resposta espectral à sazonalidade da disponibilidade hídrica (SILVA; CRUZ, 2018). Conforme Almeida e Medeiros (2017), a variabilidade interanual das chuvas no semiárido está relacionada com os fenômenos oceânicos e atmosféricos do El Niño e La Niña, que nos anos mais intensos indicam tendência de muita ou pouca chuva, respectivamente.

Conforme base de dados do *Climate Prediction Center* (CPC, 2019), 2017 foi o ano neutro mais próximo da atualidade, após os registros intensos de El Niño em 2015 e 2016; antecedendo os anos mais recentes sob influência da La Niña. Também foram consultados dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), que corroboraram com a neutralidade pluviométrica de 2017, cuja precipitação média anual registrada na Estação Meteorológica Convencional de Monteiro foi de 607 mm.

Definido o ano, foram selecionadas nove cenas do Sentinel-2 para abarcar a área de estudo geradas em 12/11/2023, tendo como critério a menor ocorrência de nuvens. Por fim, também foi verificada a irregularidade

de eventos de chuvas no mês de novembro nos 21 municípios que compõem a área de estudo. Conforme a AESA (2019), apenas Monteiro e São Sebastião do Umbuzeiro registraram precipitação observada de 8,9 e 5,9 mm, respectivamente.

As imagens do Satélite Sentinel-2, sensor MSI, foram disponibilizadas gratuitamente pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2019) com correção atmosférica, dispensando essa etapa de pré-processamento. Compostas por 13 bandas, as bandas B2 (azul), B3 (verde), B4 (vermelho) e B8 (infravermelho próximo) possuem resolução espacial de 10m. Com resolução de 20m, as bandas B5, B6, B7 e B8a (borda do vermelho) são estreitas, usadas para caracterização da vegetação, e as bandas B11 e B12 (SWIR) são aplicadas para detecção de neve, gelo, nuvem ou avaliação do estresse de umidade na vegetação. Por fim, as bandas B1 (aerossóis), B9 (vapor d'água) e B10 (detecção de cirros), com resolução de 60m, são utilizadas principalmente para triagem de nuvens e correção atmosférica.

A diversidade de bandas do sensor MSI, juntamente com os índices radiométricos gerados por elas, auxiliaram o processamento digital das imagens de satélite. Trata-se de um conjunto de técnicas caracterizadas pelas etapas de segmentação, criação de classes temáticas, amostragem, modelagem do conhecimento, classificação automatizada e edição manual. No software ArcGIS 10.2 foi construído o mosaico das bandas separadamente, sendo desconsideradas as bandas B1, B9 e B11; aplicados oito índices radiométricos de vegetação e de água (Tabela 1). Os resultados gerados foram salvos como imagens na extensão 'tif' para serem classificadas no software Definiens e-Cognition 8.0.1.

De acordo com Silveira et al. (2018), a reflectância registrada e os índices que podem ser gerados pelo sensor MSI favorecem o mapeamento da Caatinga, já que os intervalos espectrais das bandas do vermelho, Red-Edge e SWIR são sensíveis às variações de clorofila e vegetação não fotossintética. Dentre os índices de vegetação, Lopes et al. (2020) apontam que o NDVI é amplamente utilizado em estudos sobre dinâmica e degradação da cobertura vegetal no domínio das Caatingas.

Os mosaicos das bandas e os resultados dos índices espectrais foram utilizados como descritores durante a classificação GEOBIA realizada no software Definiens e-Cognition, sendo delimitado um quadrante maior que a área de estudo (coordenadas UTM mínimas e máximas de $x= 673778$ e 832860 ; e $y= 9076585$ e 9216154). A primeira etapa da classificação supervisionada refere-se ao processo de segmentação das imagens, ajustada ao algoritmo de multirresolução com mesmos pesos para todas as bandas utilizadas no processo, considerando as médias e desvios padrões das imagens utilizadas com pesos equivalentes a 1, parâmetro de similaridade 100, forma 0,1 e compacidade 0,5.

Tabela 1 - Índices Radiométricos de Vegetação e de Água.

| Índice | Fórmula | | Referências |
|---------|--|-----------------------------|----------------------------|
| NDVI | $\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$ | NIR = B8; Red = B4 | Rouse et al. (1973) |
| RE-NDVI | $\frac{(NIR - Red\ Edge)}{(NIR + Red\ Edge)}$ | NIR = B8; Red Edge = B6 | Gitelson e Merzlyak (1994) |
| GNDVI | $\frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$ | NIR = B8; Green = B3 | Gitelson et al. (1996) |
| SAVI | $\left(\frac{NIR - Red}{NIR + Red}\right) + L * (1 + L)$ | NIR = B8; Red = B4; L = 0,5 | Huete (1988) |
| SAVI2 | | NIR = B8; Red = B4; L = 0,3 | Huete (1988) |
| NDWI | $\frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$ | NIR = B8; SWIR = B11 | Gao (1996) |
| NDWI2 | $\frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$ | Green = B3; NIR = B8 | McFeeters (1996) |
| MNDWI | $\frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}$ | Green = B3; SWIR = B11 | Xu (2005) |

Fonte: os autores (2023).

O critério de forma considera a geometria dos objetos no momento da segmentação, em detrimento das respostas espectrais dos alvos. Optou-se por um valor de forma reduzido (0,1) para que as respostas espectrais dos alvos identificados fossem mais relevantes que a forma no momento de sua identificação. A compacidade contribui no tamanho dos objetos discriminados a partir da segmentação. Os valores definidos foram selecionados a partir de tentativas e erros, na busca por segmentos condizentes com a escala buscada no mapeamento.

Com as imagens segmentadas, os grupos de pixels são transformados em objetos e amostrados para distinguir sete classes temáticas pré-determinadas (Tabela 2). Durante a etapa de modelagem do conhecimento é possível identificar feições e descrever padrões identificadores a partir de técnicas de interpretação visual de dados com diferentes resoluções, que supera metodologias tradicionais restritas ao uso de atributos espectrais (Santos et al., 2018; Silva; Cruz, 2018; Lima et al., 2019). Trabalhos de campo durante as estações seca e úmida foram essenciais para identificar os objetos na imagem.

Nas etapas de amostragem e modelagem do conhecimento, os objetos foram representados em uma árvore de decisão top-down com dois níveis hierárquicos, conforme visualizado na Figura 1, que também apresenta os respectivos descritores. Nota-se que o uso de modelos inversos foi essencial, que utilizam a terminologia NÃO para classificar um objeto que ainda não foi classificado em um mesmo nível hierárquico. Por

exemplo, 'Outros' passa a ser classificado quando NÃO é 'Corpos Hídricos', NÃO é 'Vegetação Verde', NÃO é 'Agropasto' e NÃO é 'Vegetação Seca'.

Tabela 2 - Distinção das classes temáticas utilizadas.

| Classe Temática | Característica |
|---------------------|--|
| Corpo Hídrico | Acúmulo significativo de água na superfície, natural ou artificial, representado principalmente por açudes; |
| Afloramento Rochoso | Geralmente encontrado na forma de lajedos e <i>inselbergs</i> ; |
| Antrópico | Representado pela ocupação urbana/semiurbana consolidada ou áreas com movimentação do solo causada por atividades antrópicas; |
| Mata Exótica | Composta predominantemente por algaroba (<i>Prosopis juliflora</i>); |
| Agropasto | Áreas com elevado nível de degradação da Caatinga por extrativismo vegetal, áreas de cultivo e/ou pastoreio em meio à vegetação herbácea predominante; |
| Caatinga Rarefeita | Constituída pela vegetação herbácea, arbustiva e/ou arbórea aberta, que recobrem parcialmente o solo; |
| Caatinga Densa | Constituída pela vegetação arbóreo-arbustiva, que recobre totalmente o solo. |

Fonte: os autores (2023).

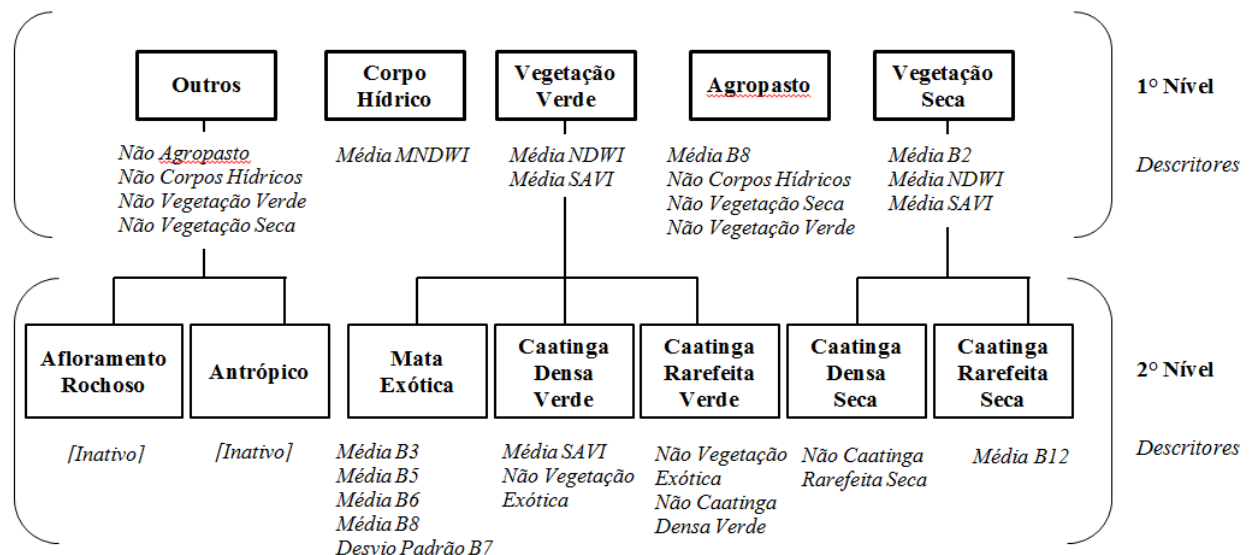


Figura 1 - Hierarquia e descritores utilizados no processo de classificação GEOBIA. (Fonte: os autores, 2023).

Em seguida houve a edição manual das classes 'afloramento rochoso' e 'antrópico', que finalizou a etapa de classificação GEOBIA no software Definiens e-Cognition. Dessa maneira, os resultados foram exportados no

formato shapefile em polígonos e, no software ArcGIS realizou-se a compatibilização das classes Caatinga Densa e Caatinga Rarefeita para agregar o mesmo valor de legenda dos respectivos polígonos de 'Caatinga verde' e 'Caatinga seca'. Por último, o pós-processamento foi realizado no software ERDAS Imagine, onde a generalização geométrica foi viabilizada a partir da aplicação de filtro de moda e eliminação de áreas mínimas (900m²), em uma vizinhança de 5x5 pixels.

O mapa de uso e cobertura da terra foi validado pela verdade terrestre. O resultado obtido na classificação foi incorporado em formato vetorial no software ArcGIS, sendo extraídos os centroides dos polígonos. Em seguida, foram criados 70 pontos para cada classe, submetidos à seleção estatística aleatória com a ferramenta subset features do módulo Geostatistical Analyst.

A coerência da classificação foi então verificada visualmente pela plataforma Google Earth e *in loco* dos 490 pontos gerados. A confiabilidade da classificação foi validada estatisticamente por uma matriz de confusão (CONGALTON, 1991), sendo calculados no Excel os coeficientes de concordância de exatidão global (Equação 1) e o índice Kappa (Equação 2), onde $-1 \leq K \leq +1$ (Tabela 03).

$$EG = \frac{A}{N} * 100 \quad (1)$$

EG = exatidão global

A = acerto geral de cada ponto amostral da diagonal

N = número total de pontos amostrais em cada classe

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{j+} x_{+i}} \quad (2)$$

K = coeficiente *Kappa*

x_{ii} = soma da diagonal da matriz de erros

n = número total de pontos amostrais
(pixels de referência)

x_{i+} = soma da linha i da matriz de confusão

c = número total de classes

x_{+i} = soma da coluna i da matriz de confusão

Tabela 3 - Divisão das classes de qualidade resultantes do índice Kappa.

| KAPPA (K) | QUALIDADE DO MAPA |
|-------------|-------------------|
| < 0,00 | Péssima |
| 0,00 – 0,20 | Ruim |
| 0,21 – 0,40 | Razoável |
| 0,41 – 0,60 | Boa |
| 0,61 – 0,80 | Muito Boa |
| 0,81 – 1,00 | Excelente |

Fonte: Landis e Koch (1977).

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A classificação GEOBIA apresentou exatidão global equivalente a 87% e Kappa de 0,85 (Tabela 4). A classificação se baseou em 10 descritores: o desvio padrão da banda B7; a média das bandas B2, B3, B5, B6, B8, B12, e os índices espectrais MNDWI, NDWI e SAVI (rever Figura 1).

Tabela 4 – Matriz de confusão com resultados obtidos pela exatidão global e índice Kappa.

| Classes | Amostras de Referência | | | | | | |
|---------------------|------------------------|---------------------|-----------|--------------|-----------|--------------------|----------------|
| | Corpo Hídrico | Afloramento Rochoso | Antrópico | Mata Exótica | Agropasto | Caatinga Rarefeita | Caatinga Densa |
| Verdade Terrestre | | | | | | | |
| Corpo Hídrico | 62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Afloramento Rochoso | 0 | 54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Antrópico | 6 | 7 | 67 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Mata Exótica | 0 | 0 | 0 | 57 | 0 | 1 | 2 |
| Agropasto | 0 | 7 | 3 | 8 | 61 | 2 | 0 |
| Caatinga Rarefeita | 2 | 2 | 0 | 0 | 7 | 61 | 4 |
| Caatinga Densa | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 | 5 | 64 |
| Exatidão Global | 87% | | | | | | |
| Índice Kappa | 0,85 | | | | | | |

Fonte: os autores (2023).

Os resultados obtidos pelo GEOBIA apenas com os índices e bandas espectrais permitiram diferenciar áreas de vegetação exótica da vegetação nativa em uma análise inédita para a escala regional adotada. A Figura 2 mostra a imagem Sentinel-2 em composição RGB 4-3-2 utilizada durante a amostragem, os pontos observados por verdade terrestre, o trajeto realizado em campo e o resultado da classificação.

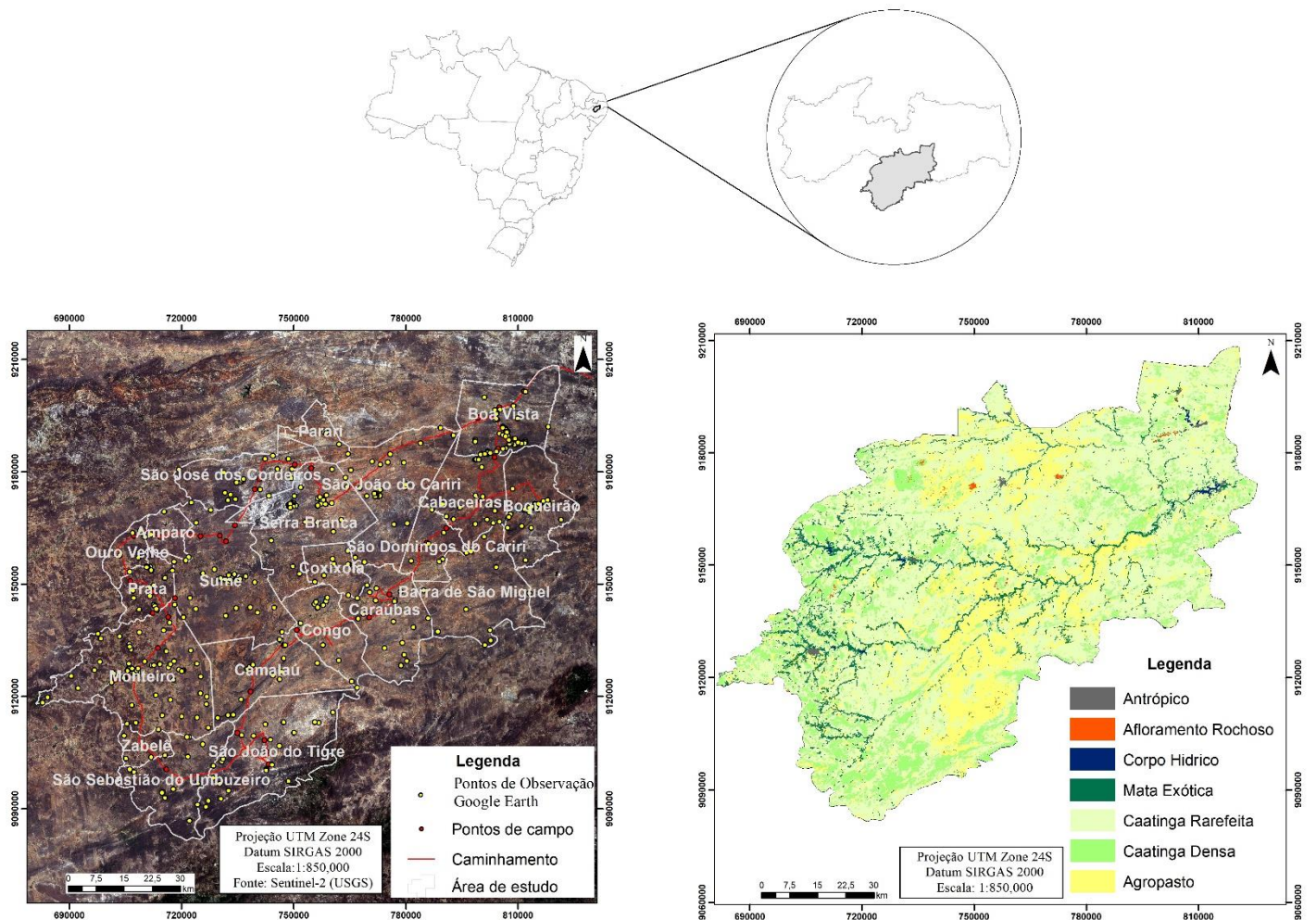


Figura 2 - Mapa de uso e cobertura da terra gerado pela classificação GEOBIA. (Fonte: os autores, 2023).

Destaca-se que o SAVI demonstrou ser mais eficiente para diferenciar a vegetação seca da vegetação verde (primeiro nível da árvore de decisão) e da Caatinga densa verde no segundo nível. Conforme Huete (1988), esse índice considera os efeitos de brilho do solo exposto a partir de uma constante L , fator utilizado para agrupar menor ou maior densidade de vegetação, com valores entre 0,25 e 1. Apesar de ter sido utilizado os valores de $L=0,3$ e $L=0,5$, a vegetação com cobertura intermediária foi a mais adequada e se destacou como importante descritor na Caatinga. Assim, apesar do NDVI ser amplamente utilizado nos estudos sobre a dinâmica e degradação da cobertura vegetal da Caatinga, há significativa influência do solo nos resultados, sobretudo em regiões semiáridas com baixa densidade de cobertura vegetal (LOPES et al.; 2020; Smith et al., 2019).

Além do SAVI, a distinção entre vegetação verde e seca também se baseou no NDWI, proposto por Gao (1996) como um índice complementar que responde a presença de umidade na vegetação, sobretudo em

dosséis. Já a média da banda B12 (SWIR) foi essencial na diferenciação da Caatinga seca por avaliar o estresse de umidade na vegetação (SILVEIRA et al., 2018; USGS, 2019). No segundo nível, a caracterização da mata exótica das Caatingas ocorreu apenas pelas bandas espectrais B3, B5, B6, B7, B8.

Para diferenciar a Mata Exótica das Caatingas Densa e Rarefeita, os índices SAVI e NDWI foram essenciais, pois permitiram identificar a presença de biomassa ajustada para o solo e a umidade na vegetação. Lima et al. (2019) também conseguiram distinguir Caatinga e não Caatinga com os mesmos índices, embora tenham utilizado outros descritores, como amplitude do relevo – já que a algaroba tende a acompanhar porções mais baixas do relevo ao longo das drenagens. O estresse da umidade na vegetação seca da Caatinga Rarefeita também foi identificado pela média da banda B12, diferenciando a Caatinga verde da mata exótica pela média do índice SAVI.

Em uma área menor, restrita à APA do Cariri, Silva et al. (2019) utilizaram na classificação GEOBIA a rede de drenagem e das vias de acesso como descritores, além da média de reflectância das bandas B2, B3, B4 e B8, da geometria e da forma. Os autores distinguiram duas classes de Caatinga (arbórea e arbustiva), área degradada, área antrópica, afloramento rochoso, plantações em planícies de rio, leito de rio e açudes. Mesmo em mapeamento mais detalhado, como o realizado por Ballén et al. (2016) na APA do Cariri com uso do NDVI e SAVI, a diferenciação entre áreas de Caatinga densa e áreas dominadas pela algaroba só puderam ser evidenciadas em campo. Já Pereira et al. (2013) conseguiram diferenciar áreas de algaroba no mapa de uso e cobertura do solo do município de São João do Cariri a partir de imagens Landsat-5/TM e CBERS-2/CCD. Para tanto, os autores se embasaram em técnicas de realce, no NDVI, composições multiespectrais ajustadas na segmentação por similaridade e na classificação não supervisionada, conforme o classificador Bhattacharya.

Após o mapeamento, cada classe foi quantificada para subsidiar a análise de uso e cobertura na região do Cariri Paraibano. Com uma área total de 9.207,72 km², a Caatinga Rarefeita representa 58,63% do território (5.398,22 km²); seguida do Agropasto, com 22,23% (2.046,99 km²); Caatinga Densa, com 15,83% (1.457,65 km²); Mata Exótica, com 2,90% (266,69 km²); Antrópico, com 0,17% (16,01 km²); Corpo Hídrico, com 0,16% (14,31 km²); e Afloramento Rochoso, com 0,09% (7,84 km²).

Ao quantificar a Mata Exótica, pode-se pensar inicialmente que ela é pouco representativa, pois abrange 2,90% da região do Cariri; assim como a baixa contribuição quantitativa verificada nas classes Antrópico, Corpo Hídrico e Afloramento Rochoso. Porém, a Figura 3 ilustra a distribuição espacial dessas classes, na qual a Mata Exótica revela estar disseminada por toda a área de estudo, acompanhando áreas de drenagens e formando uma “mata ciliar exótica”.

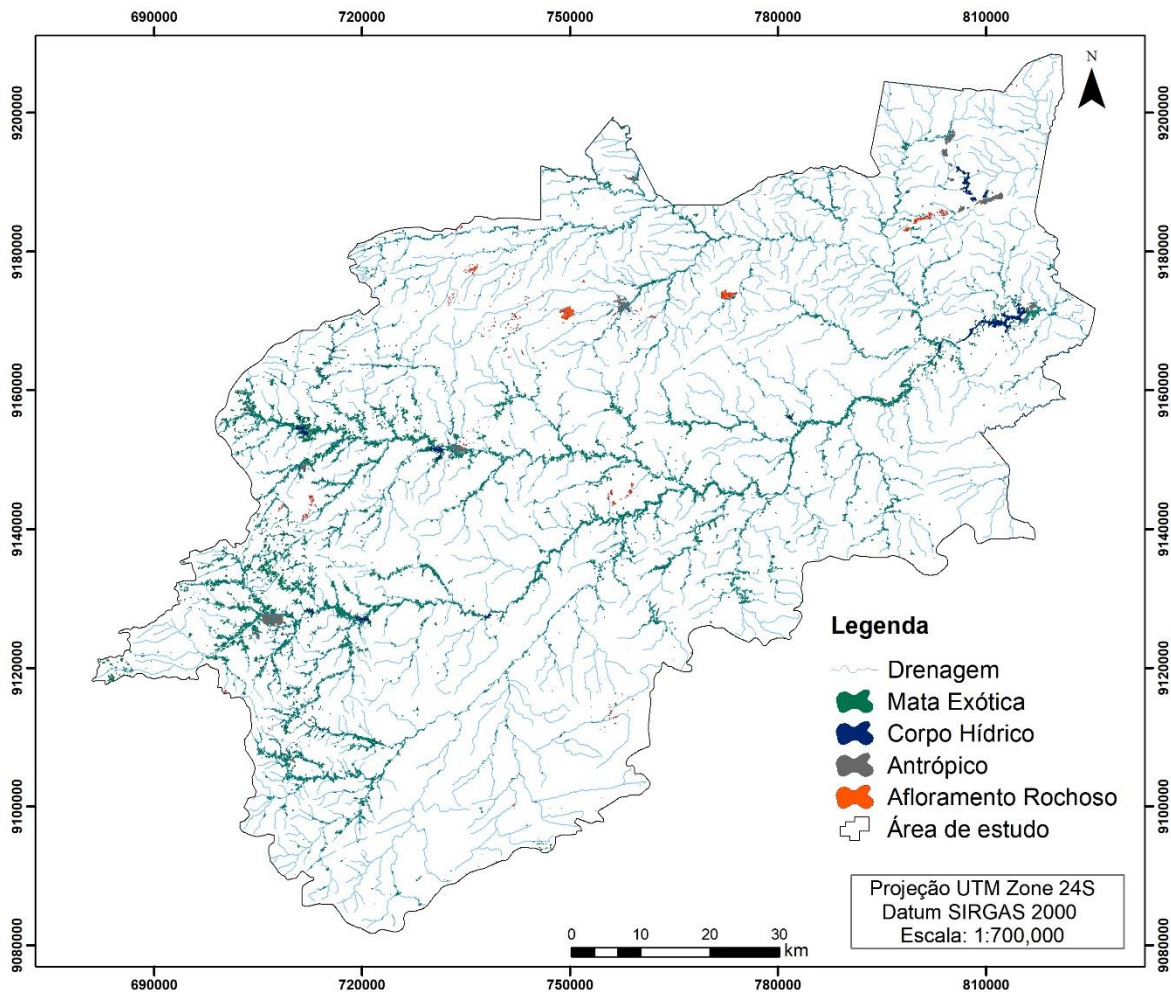


Figura 3 - Destaque da classe Mata Exótica sobreposta às drenagens existentes na região, com a localização espacial das classes antrópico, afloramento rochoso e corpo hídrico. (Fonte: os autores, 2023).

A algaroba foi introduzida no semiárido brasileiro na década de 1940 e, nos anos 1970, teve plantio estimulado por ações governamentais para substituir a vegetação original da Caatinga, principalmente pelo potencial forrageiro e como fonte de estaca e lenha (ANDRADE et al., 2010; PEREIRA et al., 2013). No entanto, Andrade et al. (2010) ressaltam que a invasão da espécie interfere na resiliência dos ecossistemas e afeta a diversidade autóctone da Caatinga, o que aumenta a vulnerabilidade ambiental.

Para Pereira et al. (2013), a expansão da espécie exótica também resulta em uma maior vulnerabilidade socioeconômica local. Os autores identificaram a ocupação contínua da espécie em áreas de solos férteis, principalmente nas margens de rios. Mas o sistema radicular da algaroba favorece a erosão fluvial, reduz áreas agrícolas afetadas por enxurradas e inviabiliza qualquer atividade consorciada. Atualmente observa-se a supressão em áreas de plantio por parte dos proprietários que, de forma empírica, utilizam técnicas de controle

pouco eficientes. Dentre eles, o uso do fogo e de herbicidas evidencia a lacuna do conhecimento científico para mitigar o avanço da espécie e os efeitos dessas práticas à saúde humana e ao meio ambiente (PEREIRA et al., 2013; Gonçalves et al., 2015)

O intenso uso antrópico associado à agricultura e à pecuária se destaca na área de estudo, mesmo com a predominância de pequenas comunidades e vilarejos dispersos, que inviabilizam a identificação no mapeamento com a escala adotada. Incluídas na classe Agropasto, essas atividades representam 22,23% da área de estudo, cuja abrangência pode ser ainda maior ao considerar os animais soltos que se alimentam da vegetação nativa. De acordo com Lima et al. (2019) e Pereira et al. (2020), a degradação ambiental oriunda dessa importante atividade econômica na região tende a ocupar áreas com superfícies planas e levemente onduladas, ressaltando a importância dos afloramentos rochosos na conservação da Caatinga.

O uso antrópico tem alterado solos e a vegetação natural do bioma, em uma estreita relação entre degradação e desertificação. Na Paraíba, a rarefação ou ausência da cobertura vegetal do Cariri faz com que essa região seja destacada pelos altos níveis de desertificação. Em contraponto, nas áreas de Caatinga pouco modificadas, a diversidade florística supera muitos outros remanescentes preservados de FTSS existentes (SOUZA et al., 2015).

Na área de estudo, a Caatinga Rarefeita representa 58,63% do território, sendo a classe mais representativa. As espécies pioneiras são comumente encontradas, o que pode indicar uma alteração da cobertura vegetal no passado. Marinho et al. (2016), ao avaliarem os efeitos uso da terra na regeneração da comunidade de plantas lenhosas da Caatinga nos últimos 20 anos, identificaram uma cobertura vegetal relativamente alta nas parcelas pouco utilizadas no pastejo, o que indica a capacidade de recuperação desses ambientes com o afastamento dos animais. Já a Caatinga Densa ocupa 15,83% da área de estudo e encontra-se dispersa por toda a região do Cariri Paraibano, sendo essencial na formação do característico mosaico heterogêneo do bioma.

Ainda que se tenha uma elevada representatividade da Caatinga Rarefeita e a presença de áreas com Caatinga Densa, cabe lembrar que a proteção da biodiversidade e da geodiversidade na área de estudo é incipiente. Nesse sentido, para complementar a análise de uso e cobertura da terra, quantificou-se a contribuição de cada classe temática na perspectiva das quatro UCs existentes e na proposta de criação do Geoparque, ilustradas na Figura 4.

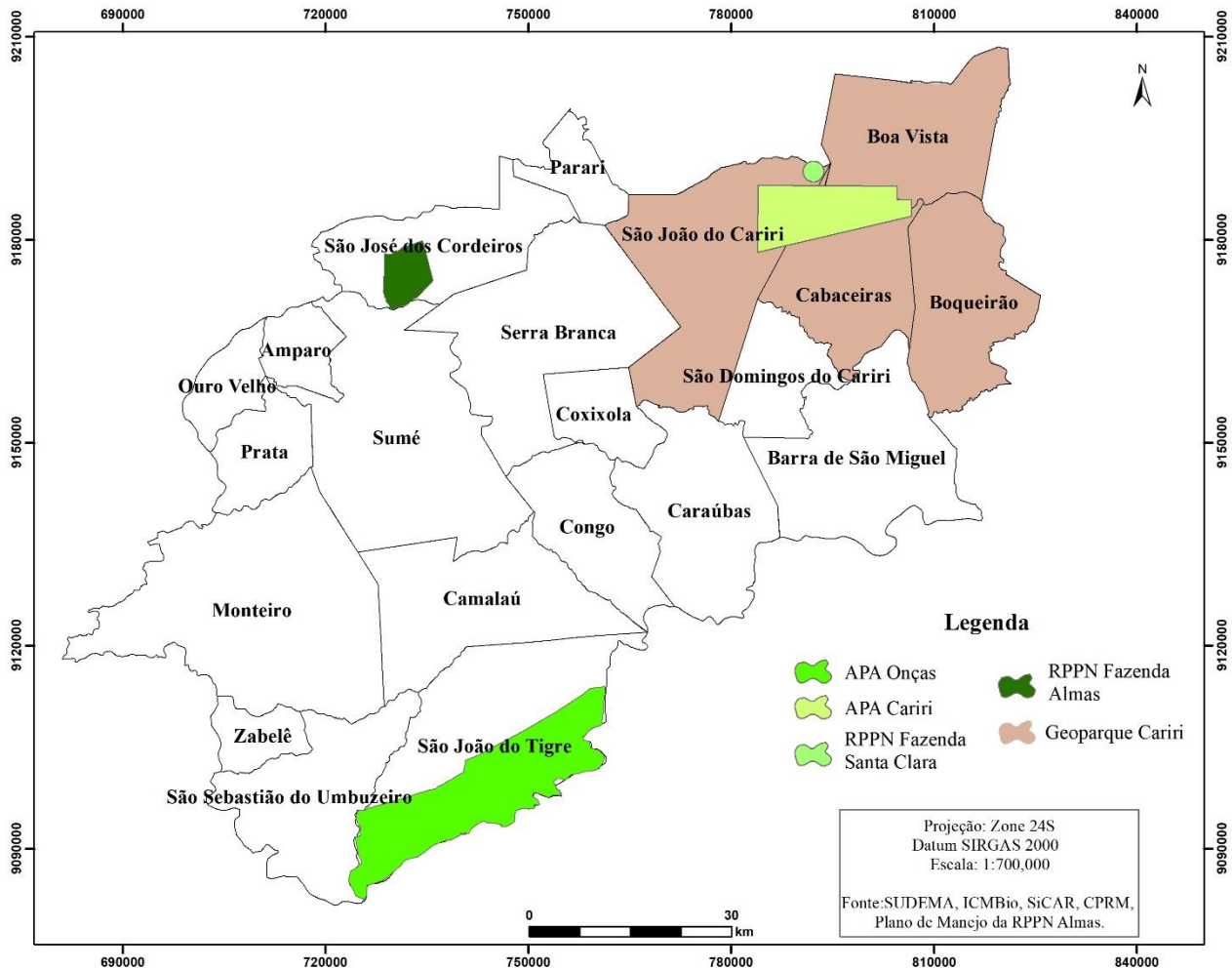


Figura 4 - Localização das UCs e áreas propostas para geoconservação na região estudada. (Fonte: os autores, 2023).

Localizada no município de São João do Tigre, a APA das Onças é a maior UC da área de estudo, com aproximadamente 381 km². De acordo com Borges et al. (2017), a vegetação na APA das Onças é caracterizada pela Caatinga arbórea e arbustiva, ocorrendo tanto de forma densa ou aberta; e possui um antropismo baseado na agricultura de subsistência. Na UC, a Caatinga Rarefeita corresponde a 42,32%, seguida da Caatinga Densa, com 35,99% e do Agropasto, com 21,45%. Em menor proporção encontra-se a Mata Exótica, com 0,22%, e Afloramento Rochoso, com 0,01%; não são encontradas as classes Corpo Hídrico e Antrópico. Destaca-se a representatividade das duas classes de Caatinga, que juntas correspondem a 75,95% da UC.

Os resultados obtidos se aproximam aos de Pereira et al. (2020), que analisaram a influência do relevo no uso e ocupação do solo nessa UC. Embora os autores tenham definido cinco classes (Vegetação Esparsa, Vegetação Semidensa, Vegetação Densa, Solo Exposto e Água) e utilizado técnicas de mapeamento que se diferem das aqui adotadas, as três classes de vegetação totalizaram 77,91%.

Ademais, Borges et al. (2017) propuseram uma representação geoespacial, gráfica e temática da geodiversidade existente na APA, na qual quantificaram 14 geossítios potenciais para análise. Mesmo diante da potencialidade existente, Pereira et al. (2020) observaram um maior nível de degradação ambiental em regiões mais planas com baixo teor de umidade; e apontam a fragilidade da UC frente a interferência antrópica das comunidades locais.

A RPPN Fazenda Almas situa-se no limite dos municípios de São José dos Cordeiros e Sumé. Ela possui cerca de 51 km², sendo 60,82% representados pela Caatinga Densa; 36,13% de Caatinga Rarefeita; 2,51% de Agropasto; 0,29% de Afloramento Rochoso e 0,24% de Algaroba. Percebe-se que quase a totalidade da UC (96,95%) corresponde a áreas de Caatinga. Para Lima e Barbosa (2014), trata-se de uma área ímpar em termos de conservação da vegetação, com elevada riqueza de espécies, que pode estar associada à dificuldade de acesso no interior da RPPN e à diversidade de microhabitats capazes de minimizar os efeitos da seca, atuando como refúgios ecológicos.

A APA do Cariri abrange aproximadamente 157 km², sendo 76,33% representados pela Caatinga Rarefeita; 16,45% de Caatinga Densa; 3,71% de Agropasto; 2,64% de Mata Exótica; 0,81% de Afloramento Rochoso e 0,07% de antrópico. Silva et al. (2019) analisaram o grau de intervenção antrópica no interior da UC, a partir de um mapeamento que considerou o porte da vegetação e variáveis socioambientais. Os resultados obtidos pelos autores indicam a predominância da Caatinga arbustiva (61%) e elevados níveis de transformação ambiental motivada pela exploração de bentonita e atividades agropecuárias.

Apesar da vulnerabilidade apresentada, destaca-se que a APA também está associada à geoconservação, que deverá incluir cinco sítios da geodiversidade, sete geossítios de relevância nacional e um de relevância internacional. A consolidação desses ambientes torna-se mais uma ferramenta para promover o desenvolvimento sustentável local, que deve integrar interesses da comunidade, das empresas mineradoras e da gestão da UC.

A RPPN Fazenda Santa Clara é a menor UC encontrada na área de estudo e apresenta a maior carência de estudos científicos em seu território, embora tenha sido criada na década de 1990. Sem um limite oficial e nem plano de manejo, a área foi mensurada pelo Instituto Chico Mendes da Biodiversidade através das coordenadas inseridas no Sistema Informatizado de Monitoria de RPPN. Dos aproximados 6,34 km², 62,05% correspondem à Caatinga Rarefeita, 36,32% de Caatinga Densa e 1,63% de Agropasto.

Em um estudo sobre a composição florística de plantas vasculares presentes na RPPN, Queiroz et al. (2017) identificaram dois tipos de vegetação conforme densidade e porte das plantas vasculares: a formação

aberta e formação fechada, que podem ser relacionadas com as classes de Caatinga Rarefeita e Caatinga Densa. A formação aberta foi caracterizada pela baixa densidade e diversidade de espécies, com maior número de caracteres xerofílicos, relacionados à maior aridez na área e ação antrópica intensificada pela presença de gado.

IV. CONCLUSÕES

O mapeamento por sensoriamento remoto na Caatinga é extremamente complexo devido ao comportamento espectral da vegetação, altamente influenciado pela irregularidade dos eventos de chuvas. O uso das técnicas aqui apresentadas pode subsidiar novos estudos de detecção da cobertura vegetal de Florestas Tropicais Sazonalmente Secas e embasar a melhoria contínua no uso das geotecnologias para a conservação de ambientes com características peculiares.

Aqui, o mapa de uso e ocupação da terra no contexto regional do Cariri Paraibano diferenciou áreas com predomínio da algaroba (Mata Exótica) de remanescentes nativos de Caatinga (Densa e Rarefeita). Trata-se de um resultado inédito e que muito pode contribuir para mensurar áreas degradadas e nativas, de modo a subsidiar áreas prioritárias para controle da espécie invasora e novos estudos para a conservação desse bioma historicamente negligenciado pelos gestores públicos.

V. REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. Caatingas: o domínio dos sertões secos. In: AB'SABER, A. N. Os Domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2011. 6ª ed., 160p.

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <<http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/mapas.html>>. Acesso em 09 de agosto de 2019.

ALMEIDA, H. A.; MEDEIROS, E. A. Variabilidade no regime pluvial em duas mesorregiões da Paraíba e sua relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 02, n. 03, p. 177-185, 2017. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1340.177-185>

ANDRADE, L. A.; FABRICANTE, J. R.; OLIVEIRA, F. X. Impactos da invasão de *Prosopis juliflora* (sw.) DC. (Fabaceae) sobre o estrato arbustivo-arbóreo em áreas de Caatinga no Estado da Paraíba, Brasil. *Maringá*, v. 32, n. 3, p. 249-255, 2010. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v32i3.4535>

BALLÉN, L. A.; SOUZA, B. I.; LIMA, E. R. V. Análise espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental do Cariri, Paraíba, Brasil. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 36, n. 3, p. 555-571, 2016.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, v. 58, p. 116-127, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017>

BORGES, U. N.; PACHECO, A. P.; MARIANO, G. Uma contextualização espacial e temática da Geodiversidade: APA das Onças/PB/Brasil. *Estudos Geológicos*, n. 27, p. 143-160, 2017.

BRASIL. Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000. Regulamenta o artigo 225, § 1º, incisos I, II, III, VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 2000.

CPC – CLIMATE PREDICTION CENTER. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em 09 de agosto de 2019.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)

DIAS, L. C.; FERREIRA, G. C. A Geoconservação sob a ótica legislativa: uma análise comparativa de leis nacionais e internacionais sobre a proteção do patrimônio geológico. *Revista Geociências UNESP*, v. 37, n. 1, p. 211-223, 2018. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i1.11186>

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; CHAVES, L. H. G.; LIMA, E. R. V.; SILVA, B. B. Análise espectral e avaliação de índices de vegetação para o mapeamento da caatinga. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 10, n. 3, p. 01-12, 2015. <https://doi.org/10.18378/rvads.v10i3.3046>

GAO, B. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, n. 3, p. 257-366, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

GITELSON, A.; MERZLYAK, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemical and Photobiology B: Biology* 22: 247-252. 1994. [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](https://doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4)

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; LICHTENTHALER, H. K. Detection of red edge position and Chlorophyll. *Journal Plant of Physiology* 148: 501-508. 1996. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80285-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80285-9)

GONÇALVES, G. S.; ANDRADE, L. A., XAVIER, K. R. F.; SILVA, J. F. Métodos de controle de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. (Fabaceae) em áreas invadidas no semiárido do Brasil. *Ciência Florestal*, n. 25, p. 645-653, 2015. <https://doi.org/10.5902/1980509819615>

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, n. 25, p. 295-309, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em 09 de dezembro de 2023.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_conv_graf. Acesso em 10 de outubro de 2019.

LAGES, G. A.; FERREIRA, R. V.; MENESES, L. F. NASCIMENTO, M. A. L.; FIALHO, D. Geoparque Cariri: proposta. CPRM, 2018. 59p. Disponível em <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/20244>

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

- LIMA, F. S.; ALMEIDA, N. V. Dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental (APA) do Cariri, Paraíba-PB, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 3, p. 699-721, 2017.
- LIMA, I. B.; BARBOSA, M. R. V. Composição florística da RPPN Fazenda Almas, no Cariri Paraibano, Paraíba, Brasil. *Revista Nordestina de Biologia*, n. 23, p. 49-67, 2014.
- LIMA, V. R. P.; SEABRA, V. S.; XAVIER, R. A.; DORNELLAS, P. C. Análise do Padrão Espacial do Uso e Cobertura do Solo e da Fragmentação e Conectividade da Vegetação no Semiárido do Nordeste Brasileiro: Bacias Dos Rios Taperoá e Alto Paraíba-PB. *Revista de Estudios Andaluces*, v. 37, p. 25-49, 2019. <https://doi.org/10.12795/rea.2019.i37.02>.
- LOPES, R. J. C.; SANTOS, A. M.; ZLATAR, T.; LIMA JÚNIOR, C. Uso de índices de vegetação por sensoriamento remoto para estudos da Caatinga: uma revisão sistemática. *Gaia Scientia*, v. 14, p. 104-116, 2020. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2020v14n1.48862>
- MARINHO, F. P.; MAZZOCHINI, G. G.; MANHÃES, A. P.; WEISSER, W. W.; GANADE, G. Effects of past and present land use on vegetation cover and regeneration in a tropical dryland forest. *Journal of Arid Environments*. v. 132, p. 22-33, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.04.006>
- 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, p. 1425–1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- PEREIRA, R. A.; ALCÂNTARA, C. R.; NETO, J. D.; BARBOSA, E. M. Análise Espaço-Temporal da Cobertura Vegetal e do Avanço de *Prosopis juliflora* (SW) DC numa área de Caatinga. *RA'EGA*, v. 28, p. 154-180, 2013.
- PEREIRA, V. H. P.; CESTARO, L. A. Corredores ecológicos no Brasil: avaliação sobre os principais critérios utilizados para definição de áreas potenciais. *Caminhos da Geografia*, v. 17, n. 58, p. 16-33, 2016. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.245694>
- QUEIROZ, R. T.; MEDEIROS, J. R.; TREJO, I. Levantamento Florístico das Plantas Vasculares da RPPN Fazenda Santa Clara – São João do Cariri (Bioma Caatinga). In: Abílio, F.J.P. (Org.), *Educação Ambiental em Unidades de Conservação do Bioma Caatinga*. Editora UFPB, João Pessoa, 2017. p. 291-329.
- ROUSE, J.; HAAS, R.; SCHELL, J.; DEERING, D. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA*, p. 309-317, 1973.
- SANTOS, A. A. B.; COSTA, E. C. P.; LOURENÇO, J. S. Q. Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Litoral Leste Fluminense. In: SEABRA, V. S.; AUGUSTO, R. C. (org). *Dinâmicas Ambientais e Geoprocessamento no Litoral Leste do Estado do Rio de Janeiro*, 2018. 137p. p. 69-98.
- SANTOS, J. C.; LEAL, I. R.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; FERNANDES, G. W.; TABARELLI, M. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. *Tropical Conservation Science*, v. 4, n.3, p. 276-286, 2011. <https://doi.org/10.1177/194008291100400306>
- SEABRA, V. S.; XAVIER, R. A.; DAMASCENO, J.; DORNELLAS, P. C. Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo da Bacia do Rio Taperoá: Região Semiárida do Estado da Paraíba. *Caminhos de Geografia*, v. 15, n. 50, p. 127-137, 2014. <https://doi.org/10.14393/RCG155024249>
- SILVA, D. V. P.; CRUZ, C. B. M. Tipologias de Caatinga: uma revisão em apoio a mapeamentos através de sensoriamento remoto orbital e GEOBIA. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 33, p. 113-120, 2018. <https://doi.org/10.11606/rdg.v35i0.142710>

SILVA, L. F.; SOUZA, B. I.; BACANI, V. M. Intensidade da ação antrópica na Área de Proteção Ambiental do Cariri Paraibano. *Caminhos de Geografia*, v. 20, n. 71, p. 364-385, 2019. <https://doi.org/10.14393/RCG207145788>

SILVEIRA, H. L. F.; GALVÃO, L. S.; SANCHES, I. D.; SÁ, I. B.; TAURA, T. A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, n. 73, p. 179-190, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.016>

SMITH, W. K.; DANNENBERG, M. P.; YAN, D.; HERRMANN, S.; BARNES, M. L.; BARRON-GAFFORD, G. A.; MOORE, D. J. P.; NAGLER, P. L.; REED, S. C.; RUTHERFORD, W. A.; SCOTT, R. L.; WANG, X.; YANG, J. Remote sensing of dryland ecosystem structure and function: Progress, challenges, and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, v. 233, 111401, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111401>

SOUZA, B. I.; ARTIGAS, R. C.; LIMA, E. R. V. Caatinga e Desertificação. *Mercator*, v. 14, n. 1, p. 131-150, 2015. <https://doi.org/10.4215/RM2015.1401.0009>

USGS – United States Geological Survey. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em 10 de agosto de 2019.

XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens*, 27, 3025–3033, 2006. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
