

ILHAS DE FLORESTAS ÚMIDAS EM MEIO AO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: MAPEAMENTO DOS BREJOS NORDESTINOS DE ALTITUDE DO DOMÍNIO DA CAATINGA USANDO SENSORIAMENTO REMOTO

Taynara Rabelo-Costa

Marcelo Freire Moro

Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Encravados em meio ao Domínio Biogeográfico da Caatinga, onde predomina o clima semiárido, há áreas elevadas muito mais úmidas, devido ao efeito das chuvas orográficas. Essas áreas elevadas e chuvosas em meio à caatinga decídua abrigam encaves de florestas semi-decíduas ou perenifólias: os chamados brejos nordestinos de altitude (BNA). Essas áreas são resquícios das flutuações climáticas do Pleistoceno e são consideradas áreas prioritárias para a conservação, protegidas pela Lei da Mata Atlântica. Entretanto, um mapa detalhado desses ambientes em meio à Caatinga ainda não está disponível. Usando NDVI, modelos digitais de elevação e processamento de imagens de satélite, geramos um mapa de ocorrência dos BNA na Caatinga, inspecionando os dados de NDVI e elevação e vetorizando os polígonos que representam esse ecossistema. Nosso mapa revela a ocorrência de BNA em quase todos os estados brasileiros abrangidos pela Caatinga e permite o uso de nosso estudo por futuras pesquisas de conservação e biogeografia sobre esse ambiente disjuncto e úmido em meio ao semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Encaves vegetacionais; Mapeamento da vegetação brasileira; Mata atlântica; NDVI.

ABSTRACT

Amid the semiarid Caatinga Biogeographic Dominion of Brazil there are areas significantly wetter than the surroundings, resulting from orographic rainfall that sustain enclaves of semideciduous or evergreen forests: the *Brejos Nordestinos de Altitude* (BNA). These areas are remnants of Pleistocene climate fluctuations and are considered priority areas for conservation, protected under the Atlantic Forest Law. However, a detailed map of these environments within the Caatinga is still unavailable. Using NDVI, digital elevation models, and satellite image processing, we generated a map of BNA occurrences in the Caatinga. We manually inspected the data and digitized the polygons. Our map reveals the presence of BNA in nearly all Brazilian states where the Caatinga is found. We provide shapefiles to support multiple environmental studies, including research regarding conservation and biogeography of this disjunct ecosystem.

Key words: Vegetation enclaves; Brazilian vegetation mapping; Atlantic forest; NDVI.

INTRODUÇÃO

O Domínio Biogeográfico da Caatinga (DBC - Figura 1) é uma das grandes regiões naturais da América do Sul (IBGE, 2019; Moro et al., 2024; Morrone, 2014). Posicionado em áreas tropicais, mas exposto a um clima muito mais seco que as outras áreas ao seu redor, o DBC

é um ambiente com paisagens diferenciadas, moldadas sob um clima semiárido quente e seco, com uma biota adaptada à forte estacionalidade das chuvas (Queiroz et al., 2017; Moro et al., 2024). Enquanto a maior parte do país abriga ou florestas tropicais úmidas, ou savanas, sob regimes de maior precipitação, no centro do Nordeste brasileiro e no norte de Minas Gerais temos o predomínio do clima semiárido (Alvares et al., 2013; Nimer, 1972, 1989). Nessas áreas, que possuem geomorfologias variadas, mas com predomínio de terras baixas (Costa et al., 2020), encontramos o domínio de um tipo especializado de vegetação, a 'caatinga'. A caatinga corresponde a um gradiente de fitofisionomias, desde arbustivas abertas e arbustivas densas até florestas bem desenvolvidas, que possuem forte deciduidade foliar e adaptações para lidar com uma longa estação seca, que supera seis meses no ano (Moro et al., 2016, 2024; Prado, 2003; Queiroz et al., 2017).

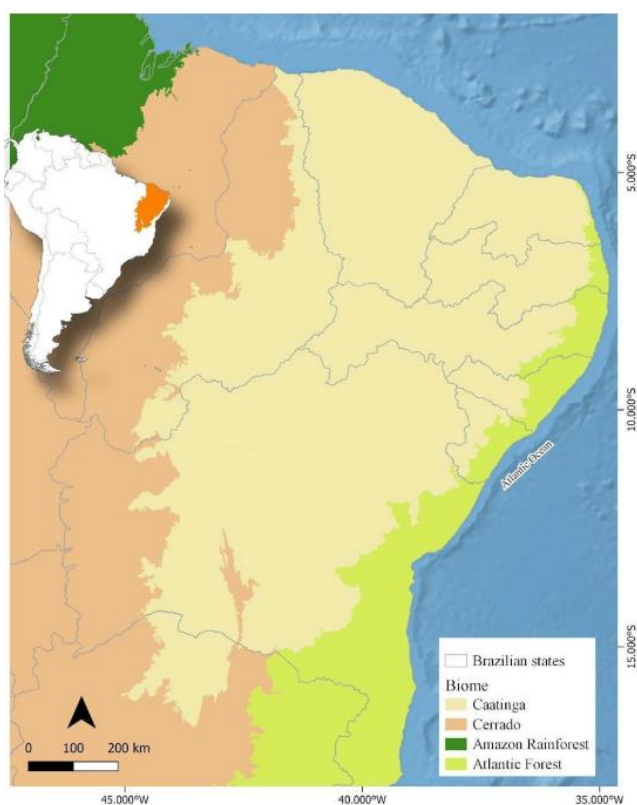


Figura 1- Localização geográfica do Domínio Biogeográfico da Caatinga, posicionado entre a Mata Atlântica e o Cerrado. Limites da Caatinga segundo IBGE (2019).

A vegetação de caatinga, em todas as suas variantes (caatingas de areia, caatinga *sensu stricto* arbustiva, caatinga *sensu stricto* de porte arbóreo etc. - Ver Moro et al. 2016; 2024) é o tipo predominante de ecossistema dentro do Domínio Biogeográfico da Caatinga. São áreas que historicamente foram pouco compreendidas em relação à sua biota, pois a condição de semi aridez foi muitas vezes associada pela sociedade a uma imagem de “seca”, “pobreza”, “sofrimento humano” e falta de relevância para conservação natural (Silva, 2003; Teixeira et al., 2021), gerando uma imagem negativa que depois resultou em pouca proteção ambiental para os ecossistemas da Caatinga (Teixeira et al., 2021). Hoje sabemos que a vegetação de caatinga é composta por milhares de espécies vegetais nativas, bem adaptadas ao clima semiárido e com presença de centenas de

espécies endêmicas, restritas aos ecossistemas típicos do DBC (Fernandes et al., 2020; Moro et al., 2024; Queiroz et al., 2017). Tipicamente, a vasta maioria das plantas lenhosas da caatinga são decíduas, e algumas delas armazenam água nos caules ou raízes para enfrentar a longa estação seca. Já a maioria das plantas herbáceas são terófitos, ou seja, são ervas anuais que germinam no início da estação chuvosa e completam seu ciclo de vida rapidamente, produzindo sementes e morrendo quando se inicia a estação seca (Moro et al., 2016).

Mas, em meio às vastas áreas dominadas pela vegetação de caatinga decídua, encontramos também encaves de ecossistemas contrastantes, biogeograficamente e ecologicamente muito distintos da vegetação de caatinga (ver Moro et al. 2024). Um desses encaves são os “Brejos Nordestinos de Altitude” (BNA - Figura 2), que representam ecossistemas surpreendentemente úmidos em meio ao Domínio da Caatinga, onde predomina o clima semiárido. Essas áreas abrigam florestas perenifólias (ou semidecíduas em alguns contextos), associadas topograficamente às áreas de terras altas em meio à Caatinga e que são biogeograficamente classificadas como pertencentes à Mata Atlântica (Moro et al., 2024; Pôrto et al., 2004; Silvera et al., 2020).

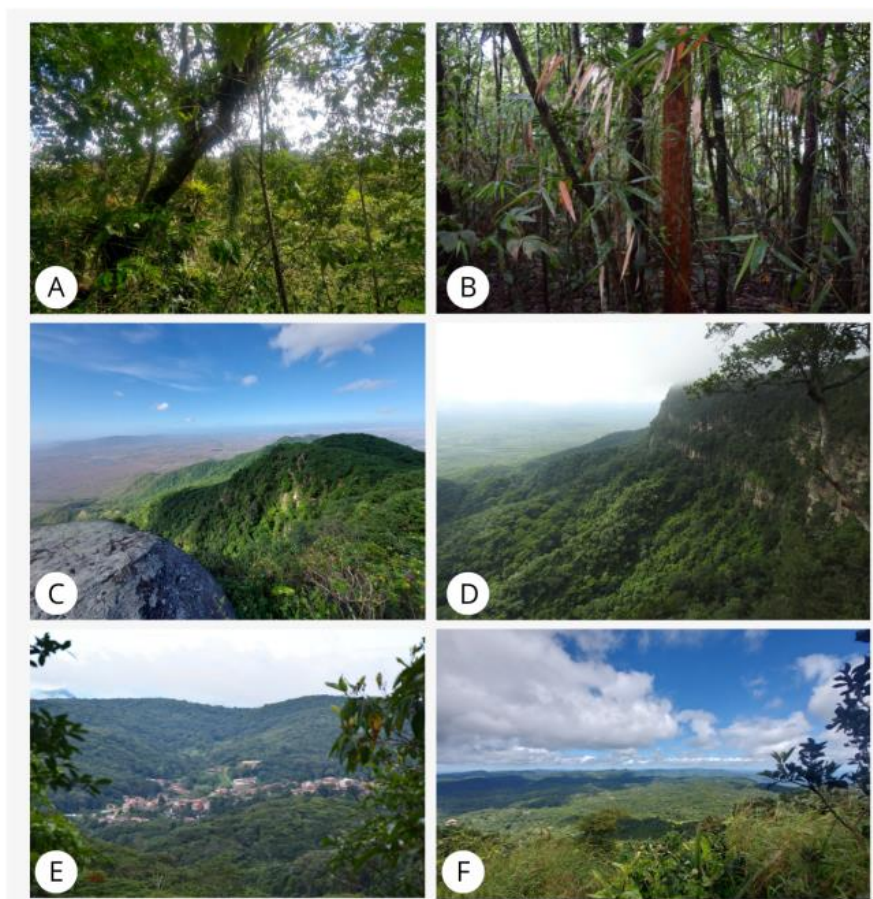


Figura 2- Áreas dos brejos nordestinos de altitude (BNA), em meio ao Domínio Biogeográfico da Caatinga (DBC). As áreas que abrigam BNA apresentam florestas sob clima mais chuvoso que a caatinga do entorno, devido às chuvas orográficas, resultando em encaves de florestas perenifólias ou semidecíduas associadas às serras do DBC, enquanto a vegetação decídua de caatinga domina as terras baixas ao redor das serras. Crédito da prancha: Moro et al. 2024. The Botanical Review. A-B: Interior da mata úmida da Serra de Baturité, Ceará; C: Topo da Serra de Maranguape, Ceará, mostrando o gradiente altitudinal, com uma floresta úmida no topo da serra e a caatinga decídua nas terras baixas ao

redor. D: Mata úmida na vertente da Serra da Ibiapaba, Parque Nacional de Ubajara. E-F: Mata úmida da Serra de Batu-
rité vista de mirantes, Ceará.

Esses encraves de BNA puderam se estabelecer em meio à Caatinga, tão distantes da Mata Atlântica e da Amazônia, devido às flutuações climáticas ao longo do Pleistoceno (Silveira et al., 2019). Com as flutuações climáticas, o clima da América do Sul alternou diversas vezes entre períodos mais secos e outros mais úmidos. Em momentos mais secos, ora as savanas, ora as florestas secas se expandiram para áreas hoje ocupadas pelas florestas úmidas, gerando conexões biogeográficas entre as florestas secas (o chamado Arco Pleistocênico de florestas secas) do continente (Branco et al., 2024; Bueno et al., 2017; Moggi et al., 2015; Prado & Gibbs, 1993). Em sua máxima expansão, pensa-se que as florestas secas da Caatinga e da Bolívia (floresta Chiquitano) podem ter se conectado biogeograficamente (ver uma modelagem de nicho climático que resgatou um cenário assim em Branco et al., 2024), resultando, hoje em dia, na presença de encraves de matas secas no Pantanal e no Cerrado. Do mesmo modo, em momentos que o clima foi mais propício para o cerrado, as savanas devem ter se expandido e ocupado áreas tanto da Amazônia, quanto da Mata Atlântica e até da Caatinga, resultando nos modernos encraves de vegetação savânica e de espécies típicas de cerrado *sensu stricto* em meio à Caatinga e à Amazônia (Bueno et al., 2017; Buzatti et al., 2018; Devecchi et al., 2020; Nepomuceno et al., 2021).

Por outro lado, em momentos em que o clima do continente ficou mais úmido, devemos ter tido retração das vegetações de caatinga e cerrado e expansão das florestas úmidas. Assim, em mais de um momento e por mais de uma rota, devem ter ocorrido conexões biogeográficas entre a Amazônia e a Mata Atlântica, com troca de espécies entre esses dois grandes domínios biogeográficos florestais úmidos do continente sulamericano (Batalha-Filho et al., 2013; Costa et al., 2018; Ledo & Colli, 2017; Silveira et al., 2019). Quando o clima chegou ao estado atual, a caatinga e cerrado se expandiram e as florestas úmidas chegaram à atual configuração, deixando encraves de matas úmidas isolados nas serras da Caatinga, mantidas como ilhas de áreas mais úmidas sustentadas pelas chuvas orográficas em meio ao clima semiárido que domina a região. Essas áreas úmidas receberam na literatura regional o nome de 'Brejos Nordestinos de Altitude' (BNA).

Assim, enquanto a vegetação de caatinga é fortemente decídua, os BNA possuem florestas mais úmidas, perenifólias ou semidecíduas, com várias espécies da Mata Atlântica, que se mantêm nas serras úmidas em meio ao DBC pelas chuvas orográficas. Quando as massas de ar atingem as serras e são forçadas para cima, elas resfriam e liberam sua umidade, resultando na disponibilidade aumentada de precipitação e formação de névoa, especialmente no barlavento das serras (Bétard et al., 2007; Moro et al., 2024; Pôrto et al., 2004). Assim, as serras mais úmidas da Caatinga vão abrigar encraves florestas úmidas, perenifólias ou semidecíduas, no barlavento e nas partes mais altas das serras, com a vegetação decídua de caatinga cercando, nas terras baixas ao redor e no sotavento das serras (Bétard et al., 2007; Moro et al., 2016, 2024).

Essas serras são de grande importância social e ecológica dentro do contexto da Caatinga. Elas abrigam uma fauna e flora mais ligada à Mata Atlântica, ou, no caso das serras cearenses, partilhadas entre a Mata Atlântica e Amazônia (ver Moro et al., 2015; 2024). São áreas com elevada riqueza de espécies; abrigam locais mapeados como áreas prioritárias para conservação da Caatinga e são áreas de mananciais que fornecem água para as terras baixas ao redor (Bétard et al., 2007; Moro et al., 2024; Pôrto et al., 2004).

Entretanto, a despeito da importância socioambiental dos BNA, esses ambientes estão mapeados na literatura científica apenas de modo generalizado, ou apenas para alguns estados, seja pelo estudo de Porto et al. (2004), que focou nos BNA da Paraíba e Pernambuco, seja pelo Mapa da Área de Aplicação da Lei da Mata Atlântica, do IBGE, esse último em escala 1:5.000.000, muito generalizada. Isso deixa em dúvidas sobre onde exatamente estão posicionados os BNA, os limites entre os BNA e a caatinga circundante e a área total de BNA dentro do DBC como um todo, e também para cada estado brasileiro individualmente.

Assim, nosso estudo propõe uma nova metodologia para diferenciar os BNA da vegetação de caatinga circundante, usando geoprocessamento baseado no índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e no uso de um modelo digital de elevação, para destacar as áreas com maior cobertura foliar associado às terras altas. Com essa nova abordagem, geramos aqui um mapeamento completo da distribuição do BNA dentro do DBC. Com isso, conseguimos identificar as áreas que permaneciam verdes em meio à Caatinga mesmo na estação seca, e fornecer um mapeamento moderno e atualizado para o conjunto de áreas que compõem os BNA, incluindo áreas não reconhecidas previamente em outros mapeamentos registrados na literatura. O objetivo deste trabalho foi, portanto, criar um mapa completo dos BNA, documentar os procedimentos metodológicos utilizados para obter tal mapa e fornecer para acesso livre os shapefiles e rasters gerados, para utilização de pesquisadores que estudam a biodiversidade, geografia, biogeografia ou gestão ambiental do DBC.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nosso estudo visou mapear a extensão total dos Brejos Nordestinos de Altitude (BNA) em meio ao Domínio Biogeográfico da Caatinga (DBC). Essas áreas são encaves de florestas perenifólias ou semidecíduas associadas às serras úmidas cercadas por vegetação de caatinga, que é fortemente decídua. Assim, utilizamos como espaço geográfico de análise a extensão total do polígono oficial do “Bioma Caatinga” (Domínio Biogeográfico da Caatinga) do IBGE (2019). Os BNA são chamados com diferentes nomes na literatura e diferentes autores divergem quanto a sua extensão, localização e o número de áreas desse ambiente dentro do DBC. Um ponto de concordância entre todos os autores é que esse ecossistema é associado às terras altas (localmente chamadas de ‘serras’) em meio ao DBC e que são mantidas como áreas mais úmidas do que as do entorno devido às chuvas orográficas.

A partir dessa delimitação, o mapeamento dos BNA foi dividido em duas etapas: (i) construção de uma árvore de decisão e (ii) mapeamento utilizando software de geoprocessamento.

Árvore de decisão

Um dos índices de vegetação mais usados há bastante tempo é o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Xu et al., 2022). O NDVI tem como objetivo avaliar a quantidade de vegetação em uma área (Meneses; Almeida, 2012). Esse índice varia de -1 a 1, onde valores altos indicam vegetação densa, como florestas temperadas e tropicais, e valores próximos de zero representam areia, neve e rochas sem vegetação (USGS, 2018). O índice é considerado eficiente, desde que suas limitações sejam entendidas (Huang et al., 2021).

As limitações do NDVI estão relacionadas aos efeitos do brilho do solo, atmosfera, nuvens e sombra de nuvens e sombra da copa das folhas, entre outros (Xue; Su, 2017). Entretanto, Campbell e Wynne (2011) afirmam que o NDVI é uma medida eficaz na separação de pixels caracterizados como crescimento ativo de vegetação dos que não possuem vegetação ou possuem vegetação senescente.

De modo geral, o NDVI tem várias aplicações. Essa técnica, por exemplo, pode ser usada para detectar mudanças na cobertura vegetal de uma área, com a finalidade de analisar o grau de degradação e desmatamento do local (Othman *et al.*, 2018). Também é útil no acompanhamento da desertificação (Helldén; Tottrup, 2008). Ademais, com o uso do NDVI, é possível estudar séries temporais para observar a dinâmica dos ecossistemas, como feito no estudo de Barbosa, Huete e Baethgen (2006), que analisaram a variação da vegetação no Nordeste brasileiro ao longo de 20 anos.

A vegetação de caatinga perde suas folhas durante a estação seca, resultando em valores bem mais baixos de NDVI nesse período, mas valores elevados na estação chuvosa, quando a caatinga está repleta de folhas. Assim, usamos imagens de satélite do trimestre menos chuvoso para que o NDVI pudesse destacar a diferença entre a caatinga decídua e a vegetação dos BNA no período seco dentro do Domínio da Caatinga.

A partir disso, o NDVI foi calculado durante o período seco, que se estende de julho a dezembro, para obter um maior contraste entre os BNA e a vegetação decídua de caatinga durante a estação seca.

O Landsat 8 é um dos satélites mais recentes da NASA, cobrindo o período de 2013 até o presente, e foi utilizado nesta pesquisa. Além de possuir uma resolução espacial de 30 metros, é útil para estudos em nível regional (Xie *et al.*, 2008), atendendo às necessidades dessa pesquisa. Para identificar a presença dos BNA dentro do DBC, foi selecionada a coleção Landsat 8 Collection 2 Level 2 Tier 1.

Devido às limitações no processamento de dados, uma vez que a pesquisa abrange uma série temporal de dez anos e uma escala geográfica regional (mais de 800.000 km²), foi necessário aplicar uma máscara de nuvens e correção radiométrica como pré-processamento (Xie *et al.*, 2008). Assim, o NDVI foi calculado a partir das bandas 4 e 5 da Reflectância de Superfície, com uma média estabelecida para o período da pesquisa, além da aplicação de uma máscara de nuvens e uma máscara de saturação radiométrica. Devido ao volume de processamento de dados deste estudo, as imagens de satélite foram processadas em nuvem, nos supercomputadores do Google usando a plataforma 'Google Engine'. As camadas raster com os valores de NDVI obtidas por meio do geoprocessamento no Google Earth Engine (GEE), foram baixadas e as análises subsequentes foram realizadas no QGIS 3.28.6 usando um computador pessoal.

Considerando que as matas úmidas dos BNA estão localizadas em áreas de altitude elevada, foi realizado um corte na camada por altitude, limitando a análise às áreas com elevações superiores a 400 metros acima do nível do mar. Dessa forma, foi utilizado um corte de altitude mínima para excluir do mapeamento parte das áreas verdes de baixa altitude que não se enquadram como BNA, como matas ciliares, perímetros irrigados e as florestas costeiras que margeiam a Caatinga.

A decisão de usar a altitude mínima de 400 m para o mapeamento dos BNA se baseou em validação de dados em campo realizado pelos autores na Serra de Baturité, no Ceará, onde foi

observada a transição da floresta úmida para florestas secas e Caatinga entre 400 e 350 metros de altitude no barlavento da serra. É importante destacar que os autores identificaram a presença de florestas úmidas a partir de 350 metros em alguns pontos. No entanto, o limite de 400 metros leva em consideração outros estudos, como o de Gois et al. (2019), que estabeleceram a altitude mínima para os Brejos de Altitude em 550 metros, e o de Bétard (2007), que definiu esse limite em 600 metros. Mas, em nossos trabalhos de campo, percebemos que no barlavento das serras úmidas, as matas úmidas chegam até altitudes um pouco inferiores que 400 m, enquanto no sotavento das mesmas serras, as matas úmidas vão apenas até 600-800 m de altitude. Assim, a escolha do corte de altitude em 400 metros é considerada um cenário intermediário e não excessivamente conservador, já que mapeamos os BNA de todo o DBC.

Para o mapeamento, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM de 30 metros (Shuttle Radar Topography Mission), que fornece dados topográficos de alta resolução globalmente, para obter os dados de altitude. O SRTM foi analisado conjuntamente com o raster de NDVI criado por nós na plataforma Google Engine. Portanto, nosso estudo gerou um arquivo raster contendo todos os pixels com $NDVI \geq 0,7$ durante a estação seca no DBC, em áreas com altitude $\geq 400m$, dentro dos limites da Caatinga (Figura 3). Esse é o arquivo raster inicial utilizado para a criação do nosso mapa. O valor de NDVI maior ou igual a 0,7 foi estabelecido em campo na serra de Baturité, no Ceará, onde a serra foi percorrida em diversos pontos para determinar onde a mata úmida cedia espaço para matas secas e vegetação caatinga e depois a faixa de transição foi avaliada em SIG sobre imagens de satélite e uma camada de NDVI. Com isso, vimos que a transição entre os tipos de vegetação era delimitada na faixa de 0,65 e 0,70 de NDVI. Com isso, consideramos os BNA como áreas que, em meio à Caatinga, permanecem verdes mesmo na estação seca, com NDVI igual ou superior a 0,70.

O mapeamento se iniciou com o processamento de imagens Landsat 8, usando imagens de uma década (anos 2013-2023) dentro dos limites do Domínio Biogeográfico da Caatinga, em áreas com NDVI acima de 0,7 durante a estação seca, quando a vegetação de caatinga perde as folhas, mas a vegetação dos brejos nordestinos de altitude permanece verde. Como os BNA ocorrem em áreas elevadas das serras, selecionamos apenas áreas com altitude igual ou superior a 400m.

Processamento de Dados

No ambiente de SIG, os resultados foram primeiramente recortados, atribuindo valores de NoData a zero e, em seguida, vetorizados automaticamente. Foram criados polígonos a partir dos pixels com $NDVI \geq 0,7$ gerados no arquivo raster. Dentro dos BNA, havia corpos d'água e áreas antropizadas, como áreas desmatadas, edificações, estradas e cidades, o que resultou em valores baixos de NDVI dentro de áreas com altos valores de NDVI. Então, usamos imagens de satélite de alta qualidade e alta resolução, disponíveis no software Google Earth Pro, para a limpeza dos dados, examinando visualmente as regiões de elevado NDVI com altitude acima de 400 m ao longo de diferentes períodos. Ao avaliar se uma área se caracterizaria ou não como BNA, olhamos imagens do Google Earth disponíveis para cada polígono em meses de diferentes anos, preferencialmente visualizando os dados durante a estação seca. Com isso, verificamos e avaliando se um local com baixo NDVI dentro de uma área com concentração de pixels de alto NDVI resultava de desmatamento ou de outras alterações antropogênicas, como a construção de barragens ou áreas urbanas. Assim, pudemos propor um polígono para cada BNA incluindo áreas que atualmente estão

desmatadas, mas que por inspeção da camada de NDVI e inspeção visual de imagens de satélite de alta resolução, puderam ser enquadradas como pertencentes aos BNA.

Estudos como os de Souza & Oliveira (2006), Moro et al. (2015) e Pôrto et al. (2004) forneceram informações valiosas sobre as características físicas encontradas nos BNA. Além disso, nossa experiência de campo nesses ecossistemas deu suporte substancial ao mapeamento dessas áreas. Assim, quando dentro de um BNA, detectado pelo elevado NDVI da área durante a estação seca, havia vazios derivados de desmatamento, nós vetorizamos manualmente essas áreas como pertencendo aos limites originais dos BNA (Figura 4).



Figura 4 - Ilustração do processo de mapeamento dos Brejos Nordestinos de Altitude (BNA), exemplificando a área da Serra de Baturité, no Ceará. A primeira parte da figura (a) apresenta o arquivo raster geoprocessado por nós na plataforma de computação em nuvem 'Google Earth Engine', contendo áreas com NDVI $\geq 0,7$ na estação seca e altitude ≥ 400 m acima do nível do mar; a segunda parte da figura (b) mostra uma captura de tela do Google Earth Pro da região durante a estação seca, usada como suporte para o mapeamento manual da extensão dos BNA e a diferenciação visual entre a caatinga decídua do entorno e as áreas verdes do BNA durante a estação seca. Por fim, usando o raster do NDVI $\geq 0,7$ e as imagens de satélite de alta resolução do Google Earth, nós vetorizamos manualmente cada polígono de cada BNA e cortamos novamente os polígonos pela máscara de altitudes iguais ou maiores que 400 m, resultando na figura 4(c), que exhibe o resultado final do mapeamento para o BNA da serra de Baturité. Esse procedimento foi feito para todos os BNA um a um em toda a extensão da Caatinga.

O processo de mapeamento, portanto, foi iniciado com a conversão do arquivo raster inicial do NDVI $\geq 0,7$ e altitude ≥ 400 m, em um shapefile de polígonos, que serviu de base para a delimitação manual. Durante o mapeamento, foram feitos esforços para delimitar os BNA conforme a extensão provavelmente mais próxima de sua distribuição original, utilizando imagens de satélite em uma escala de 1:50.000 e inspecionando imagens de satélite de alta resolução. Após a conclusão do mapeamento manual, o arquivo final passou por um novo recorte, no qual áreas abaixo de 400 metros ou fora dos limites da Caatinga foram novamente excluídas (Figura 4, Figura 5).

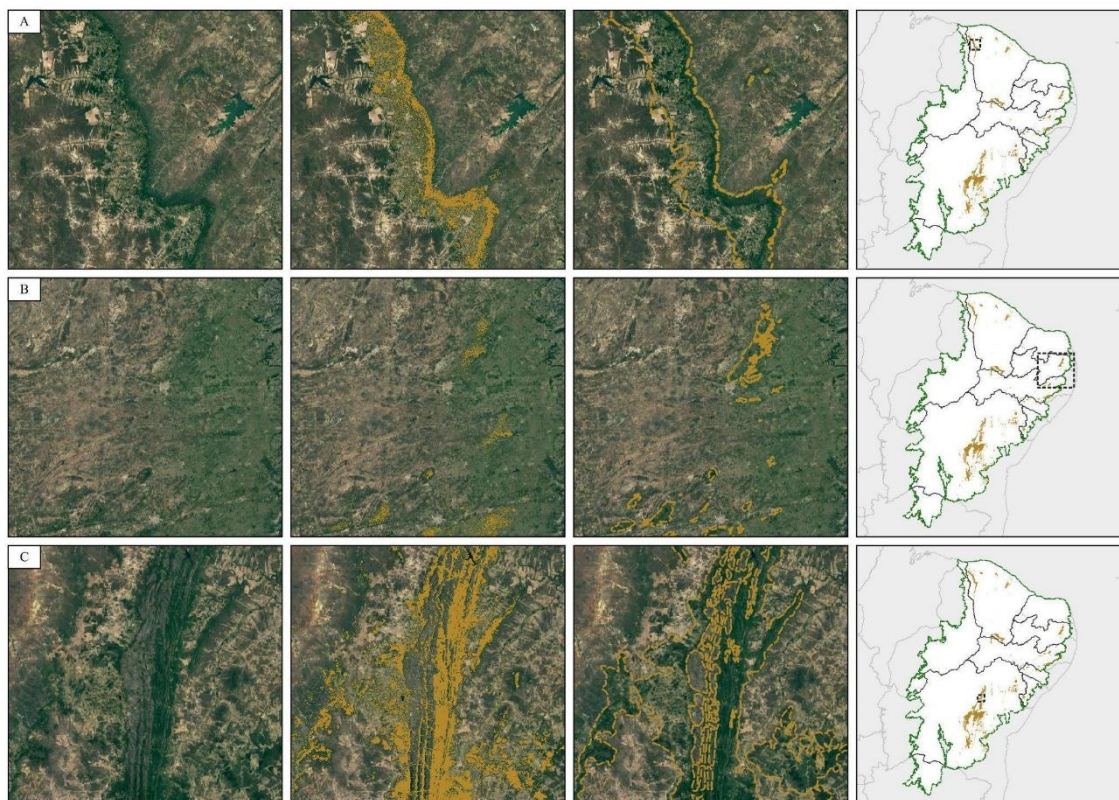


Figura 5 - Ilustração dos processos de mapeamento dos brejos nordestinos de altitude (BNA) em diferentes locais do Domínio Biogeográfico da Caatinga. A primeira linha, representada pela figura A, exibe uma imagem do Google Earth de uma área da serra da Ibiapaba, no estado do Ceará, seguindo do arquivo raster criado no Google Earth Engine, contendo áreas com NDVI $\geq 0,7$ na estação seca e altitude ≥ 400 m acima do nível do mar. Por fim, usando o raster gerado por nós e as imagens de satélite de alta resolução do software 'Google Earth Pro', nós vetorizamos manualmente os BNA e cortamos novamente pela máscara de altitudes iguais ou maiores que 400 m, resultando na delimitação final do mapeamento para o BNA. A figura 5B apresenta este mesmo processo para os brejos de altitude do Planalto da Borborema, situado nos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Por fim, a figura 5C compreende a Chapada Diamantina, e, como mostrado na figura, o mapeamento dos brejos de altitude precisou respeitar os diferentes tipos de vegetação que estão presentes na Chapada Diamantina, buscando retirar do polígono as áreas de campos rupestres, que se misturam com as florestas úmidas.

Em todos os BNA foi comum encontrar áreas desmatadas, com baixo NDVI, cercadas com pixels de áreas ainda vegetadas com NDVI elevado. Essas áreas desmatadas apareciam no nosso raster como áreas de baixo NDVI, que depois foi convertido para polígono/shapefile, como vazios, onde a floresta foi desmatada para outros usos do solo, como agricultura, pecuária, açudes ou expansão urbana. Dessa forma, consideramos que essas áreas de "vazios" em meio aos BNA representavam a área perdida por desmatamentos. Por isso, no passo final do mapeamento, nós vetorizamos um polígono que englobasse a extensão total do BNA, incluindo áreas vegetadas e desmatadas, representando os BNA aproximadamente como eles deviam existir antes das intervenções humanas. Eventualmente, podem ter ocorridos erros de delimitação neste processo, pois alguns BNA estão severamente desmatados, e pode ser que sua extensão real seja maior que a que delimitamos. Na dúvida, usamos a abordagem mais conservadora, mapeamento a menor dimensão que parecia ser BNA quando as áreas já estavam muito desmatadas.

No mapeamento, também excluimos manualmente áreas de elevado NDVI que não se caracterizava como BNA, a exemplo de áreas com matas ciliares, que permanecem verdes o ano todo devido à proximidade com rios, e não por estarem ligadas aos BNA. Também excluimos áreas de agricultura irrigada, que permanecem com elevado NDVI durante a estação seca devido ao cultivo agrícola irrigado. O suporte das imagens de satélite foi essencial para a verificação e análise detalhada da região nessa etapa do processo. Ao final do mapeamento, foi criado um mapa representando uma aproximação do que seria a extensão total dos BNA originalmente, a fim de que o mapeamento seja usado para projetos de conservação e proteção a esses ecossistemas, bem como para projetos de restauração ecológica ou estudos de biodiversidade e biogeografia.

RESULTADOS

Neste estudo produzimos um mapeamento moderno da provável distribuição original dos Brejos Nordestinos de Altitude (BNA), englobando sua ocorrência em toda a extensão do Domínio Biogeográfico da Caatinga (DBC). Usamos para isso métodos modernos de geoprocessamento e uma árvore de decisão, bem como a inspeção de imagens de satélite de alta resolução para praticamente todos os BNA e fizemos validação de dados em campo para alguns dos BNA. No total, os BNA somaram 2.479.812 hectares dentro da Caatinga, distribuídos em oito estados brasileiros (Tabela 1; Figura 6). A Bahia é o estado com maior área de BNA, somando 1.638.795 ha, seguida pelo Ceará (413.955 ha) e Pernambuco (240.625 ha). Os estados com menor área foram o Rio Grande do Norte (6.242 ha) e Piauí (13.657 ha). A área total de BNA (24.798,12 Km²) representa apenas 2,87% da área do no DBC. A maior área contínua de BNA é representada pelos encaves da Chapada Diamantina (interior da Bahia).

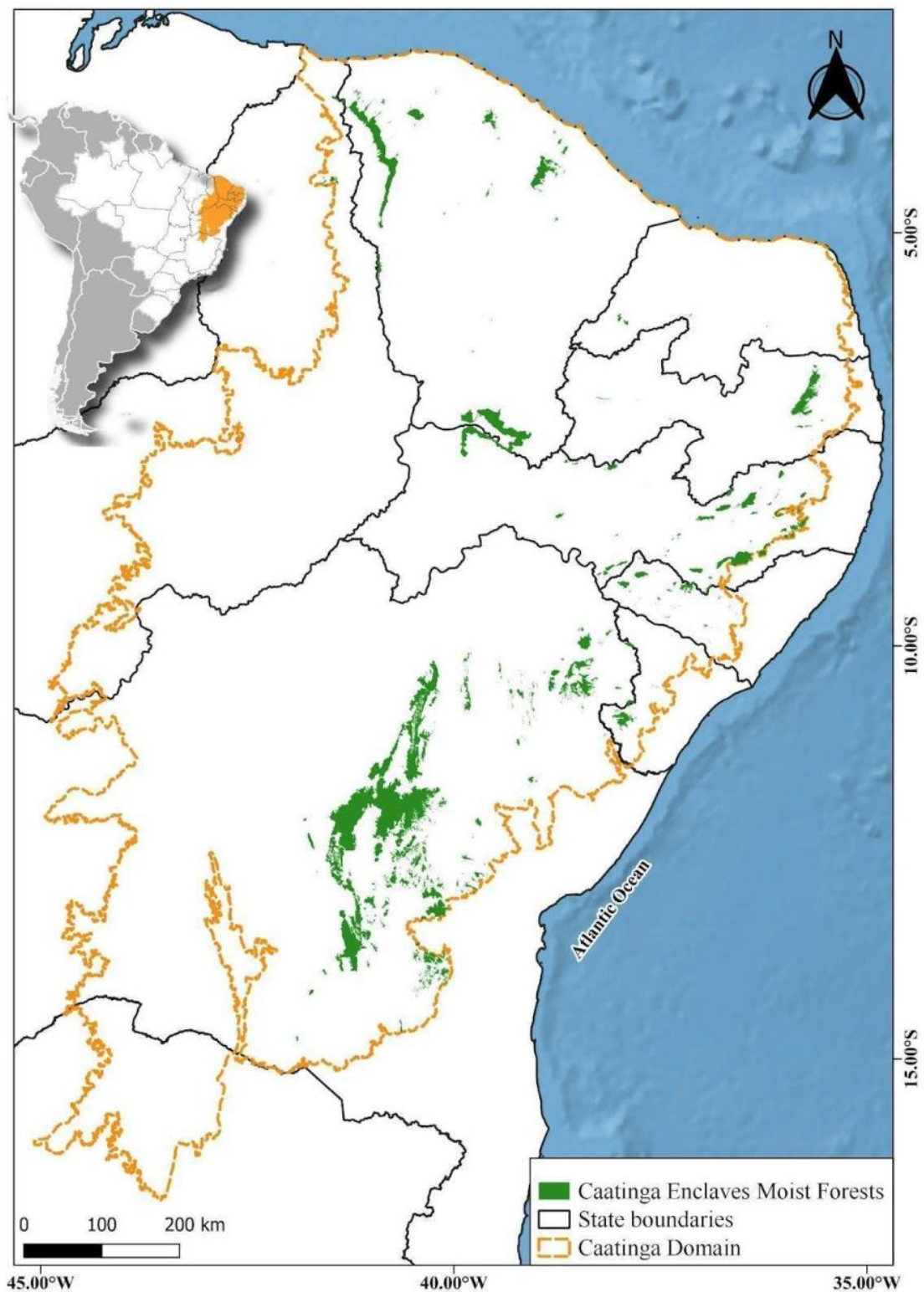


Figura 6- Mapa representando a distribuição geográfica e extensão aproximada da ocorrência natural (antes de perda de áreas por ações antrópicas) dos Brejos Nordesteiros de Altitude dentro do Domínio Biogeográfico da Caatinga.

As maiores áreas de BNA estão localizadas na Chapada Diamantina (estado da Bahia), uma região ecologicamente complexa, onde os BNA, encraves de cerrado, áreas de campos rupestres e a vegetação de caatinga se alternam ao longo de gradientes altitudinais e pluviométricos nesta rica cadeia montanhosa (Juncá et al. 2005; Moro et al. 2024; Queiroz et al. 2017; Zappi et al. 2017). Nosso mapa também expandiu a área documentada de BNA no Ceará para 4.139,55 km². Um mapa anterior, baseado no Atlas do Ceará (Figueiredo et al. 1997; Moro et al. 2015), registrava apenas 3.157 km² de BNA no estado (Tabela 1).

Estados	Brejos de Altitude	
	Área (Km ²)	% da Caatinga no estado ocupada pelos BNA
Alagoas	391,96	0,05%
Bahia	16.387,95	1,90%
Ceará	4.139,55	0,48%
Paraíba	971,02	0,11%
Pernambuco	2.406,25	0,28%
Sergipe	302,40	0,04%
Rio Grande do Norte	62,43	0,01%
Piauí	136,57	0,02%
Total	24798,12	2,87%

Tabela 1- Extensão aproximada da ocorrência natural (antes de perda de áreas por ações antrópicas) dos Brejos Nordestinos de Altitude (BNA) dentro do Domínio Biogeográfico da Caatinga, e a porcentagem do Domínio da Caatinga em cada estado que é ocupada pelos BNA. Fonte: própria dos autores.

Os BNA do Ceará merecem destaque biogeográfico especial, pois estão entre os enclaves mais distantes do Domínio da Mata Atlântica. Embora todos os BNA tenham alguma influência biogeográfica da vegetação de caatinga circundante, a maioria é compreendida como enclaves de Mata Atlântica dentro do Domínio da Caatinga (Pôrto et al., 2004), e são inclusive legalmente protegidos pela Lei da Mata Atlântica (Lei Nº 11.428/2006). No entanto, os BNA do Ceará estão situados a meio caminho entre a Mata Atlântica e a Amazônia, sofrendo influência de ambas as florestas tropicais em suas biotas, incluindo plantas, mamíferos, aves, répteis e anfíbios provenientes tanto da Mata Atlântica quanto da Amazônia, além de espécies da Caatinga (Moro et al., 2015, 2024; Silvera et al., 2020).

Os BNA representam enclaves de florestas úmidas dentro de uma área atualmente semiárida. Isso significa que, durante as flutuações climáticas dos últimos milênios, as florestas Amazônica e Atlântica se expandiram para áreas onde atualmente predominam climas mais secos, criando conexões entre ambas as florestas (Costa et al., 2018; Ledo & Colli, 2017; Silveira et al., 2019). Com o aumento da aridez na região atualmente ocupada pela Caatinga, essas florestas úmidas sobreviveram e permaneceram em enclaves isolados, associados a regiões de maior altitude das serras úmidas, onde as chuvas orográficas permitiram sua persistência.

Nosso estudo mostrou que, dos estados onde o DBC ocorre, os BNA estão ausentes apenas no estado de Minas Gerais. Em Minas Gerais, áreas que se mantinham com elevado NDVI ao longo do ano em área acima de 400 m eram associadas majoritariamente às matas ciliares ou a ambientes sazonalmente alagáveis, ou então a áreas de agricultura irrigada. Mas em todos os outros estados

brasileiros com ocorrência de Caatinga, houve alguma ocorrência de BNA, sempre associado a áreas topograficamente elevadas, desde chapadas e planaltos sedimentares até maciços cristalinos e à Chapada Diamantina.

Tipicamente, os BNA são reportados na literatura como associados ao maciço da Borborema, nos estados de Pernambuco e Paraíba, e sua existência já é reconhecida e mapeada há tempos em outros estados como Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará (Pôrto et al. 2004; Bétard et al 2007). Mas nosso estudo mostrou sua ocorrência também no estado do Piauí, associado ao município de Pedro II e ao entorno. Ademais, mostramos vastas áreas de BNA ligados à Chapada Diamantina e outras áreas elevadas da Bahia. A ocorrência dessas matas úmidas em meio ao DBC na Bahia é amplamente conhecida, e nós entendemos que elas fazem parte do contexto dos BNA, já que, conforme revelado em nosso mapa (Figura 6), essas áreas de florestas úmidas do DBC da Bahia formam de fato encaves de um tipo de ecossistema (matas úmidas) dentro de outro (caatinga), o que é justamente o que conceitua os BNA. Para nossa surpresa, usando a média de NDVI para uma década, algumas áreas sedimentares do Raso da Catarina, que faz parte do distrito biogeográfico do Tucano-Jatobá (Moro et al., 2024) também permaneceram com valores de NDVI consideravelmente mais elevados. Olhando o local com imagens de alta resolução, ficamos em dúvidas sobre a área se enquadrar melhor como um BNA ou uma área de caatinga. Entretanto, dado os valores elevados de NDVI e por estarem associados aos topos de chapadas sedimentares, mantivemos essa área em nosso mapa, e incentivamos trabalhos de campo naqueles locais para, com dados florísticos detalhados, definir se a flora daqueles locais se aproxima mais da caatinga ou mais dos outros BNA.

Nosso mapa final, em alta resolução em PDF, o shapefile da delimitação final dos BNA para outros autores criarem seus próprios mapas para estudos geográficos, biogeográficos, de biodiversidade, biogeografia ou de conservação estão disponíveis para acesso aberto no link <https://figshare.com/s/fb78eeb891d63548020e>. Do mesmo modo, o raster e o shapefile que criamos nos passos intermediários usados para chegar ao nosso mapa final, também estarão disponíveis neste artigo. Com isso, caso alguém deseje vetorizar novamente e em maior escala um dos BNA, pode baixar os dados brutos e refazer o mapeamento para seus próprios objetivos. Ou, alternativamente, como nenhum mapeamento é perfeito, futuras correções da delimitação dos BNA podem usar os dados de NDVI gerados por nós para melhorar o mapeamento disponível ou corrigir possíveis erros.

DISCUSSÕES

Os BNA foram historicamente considerados como áreas de grande relevância ecológica e biogeográfica dentro da Caatinga. Desde o século 19, com os trabalhos de Freire Allemão e da Comissão Científica de Exploração, que passou pelos BNA de Aratanha, Baturité, Araripe, Ibiapaba e outras, financiada pelo governo imperial de Dom Pedro II (Braga, 1962; Paiva, 2002), já era nítido que a flora e biota das matas úmidas presentes nas “serras frescas” do Ceará era marcadamente diferente da flora e da biota da caatinga circundante. Freire Allemão, em seus diários, até destaca que os habitantes do cariri cearense chamavam os BNA pelo nome de “caa-etê”, em distinção à caatinga, mais seca (Braga, 1962). Ou seja, o contraste de fitofisionomia e biota é tão nítido, que as diferenças entre a vegetação da caatinga e a dos BNA eram amplamente reconhecidas nas populações locais e foi rapidamente documentada por pesquisadores que circularam pelo Ceará já

no século 19. A conservação desses ambientes, inclusive, já preocupava os naturalistas da Comissão Científica de Exploração entre os anos de 1859 e 1860, quando eles destacaram em seus escritos a destruição desses ecossistemas.

A percepção de que os BNA eram parte da Mata Atlântica, representando encraves de florestas úmidas da Mata Atlântica em meio à Caatinga, fez com que alguns autores chegassem a excluir os BNA do mapa da Caatinga, representando-a com vazios no meio do mapa (Velloso et al., 2002), por não compreenderem os BNA como parte da Caatinga. Em nosso entender, essa não é a melhor solução, pois é recorrente que haja, dentro de um bioma ou de um domínio biogeográfico, encraves de outros biomas ou domínios biogeográficos. Na Amazônia, por exemplo, há encraves de savanas, campinaranas e campos rupestres (Devecchi et al., 2020); na Mata Atlântica há encraves de campos de altitude, savanas e mesmo de florestas decíduas; no Cerrado há encraves de florestas decíduas e campos rupestres. Nem por isso os cartógrafos deixam ‘vazios’ nos mapas da Mata Atlântica, Amazônia ou Cerrado. Do mesmo modo, no DBC há encraves de matas úmidas, savanas e campos rupestres (ver revisão em Moro et al. 2024), que claramente não são vegetação de caatinga, mas que estão dentro da circunscrição do DBC.

As áreas dos BNA e seu entorno também são compreendidas pelo Ministério do Meio Ambiente como ambientes prioritários para conservação na Caatinga (Ministério do Meio Ambiente, 2018) e essas áreas recebem proteção especial da Lei da Mata Atlântica (Lei 11.428/2006). A proteção especial aos BNA é justificável, pois esses ambientes diferenciados agregam elevados níveis de biodiversidade na escala da paisagem, já que a paisagem abriga ecossistemas contrastantes e, em poucos quilômetros de distância, permite a sobrevivência de biotas bastante díspares posicionadas a curtas distâncias geográficas uma das outras. Além disso, os BNA, devido à topografia elevada e chuvas mais intensas, recebem maior aporte hídrico, que abastece as terras baixas do entorno, sendo importantes fontes de água em uma região onde a água é um recurso ambiental escasso.

Ressalta, portanto, a enorme relevância ambiental dos BNA, que são a um tempo parte da biogeografia do Domínio da Caatinga, encraves de florestas úmidas contrastantes com a vegetação de caatinga, refúgios biogeográficos da biota da Mata Atlântica (e nos BNA do Ceará também da Amazônia), sendo laboratórios biogeográficos, além de serem locais de exportação do excedente hídrico para as terras baixas do entorno. Com isso, esses ambientes receberam maior proteção legal, seja na forma de Unidades de Conservação, seja pela Lei da Mata Atlântica, que no artigo 2 diz (negrito nosso):

“Art. 2º Para os efeitos desta Lei, consideram-se integrantes do Bioma Mata Atlântica as seguintes formações florestais nativas e ecossistemas associados, com as respectivas delimitações estabelecidas em mapa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, conforme regulamento: Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Mista, também denominada de Mata de Araucárias; Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Estacional Semidecidual; e Floresta Estacional Decidual, bem como os manguezais, as vegetações de restingas, campos de altitude, **brejos interioranos e encraves florestais do Nordeste.**” (Lei 11.428/2006)

Apesar de sua importância, um mapeamento moderno e atualizado para os BNA não estava disponível, sendo os mapeamentos disponíveis focados em apenas um pedaço do DBC, ou realizados em escala muito pequena, como o Mapa de Aplicação da Lei da Mata Atlântica do IBGE, que

foi elaborado em escala 1:5.000.000 (IBGE, 2006). Isso reforça a necessidade de um mapeamento mais detalhado para esses ecossistemas.

Limitações e dificuldades na delimitação dos BNA

Apesar de considerarmos esse o melhor mapa disponível até o momento para os BNA, algumas dificuldades metodológicas devem ser reconhecidas na delimitação dos BNA, que podem precisar de refinamento no futuro.

Dentre os pontos positivos, destacamos o uso do NDVI durante a estação seca, quando a vegetação de caatinga perde as folhas, mas os BNA não, para permitir o mapeamento em larga escala dos BNA. Como a vegetação de caatinga é decídua e os BNA variam entre perenifólios a semidecíduos, eles se destacam no raster gerado como áreas com elevado valor de NDVI, diferenciando as áreas de BNA da caatinga circundante. Validações em campo mostraram que o resultado obtido com geoprocessamento e a realidade de campo era condizente. Realizamos então um mapeamento detalhado no maciço de Baturité para validação no nível de detalhe, além de visitas de campo ao longo dos anos na Chapada Diamantina (Bahia), Borborema (Paraíba e Pernambuco), Serra dos Martins (Rio Grande do Norte), e Ibiapaba, Araripe, Aratanha, Maranguape, Uruburetama e Meruoca (no Ceará). De modo geral, vimos boa associação entre as áreas de BNA que tínhamos visitado em campo e as áreas destacadas pelo NDVI como BNA. Entretanto, as matas ciliares da Caatinga e áreas de agricultura irrigada permanecem com elevados valores de NDVI ao longo da estação seca, tornando necessária uma limpeza manual dos dados após inspeção visual dos polígonos contra imagens de satélite de alta resolução. Usando uma linha de corte de 400 m de altitude como limite dos BNA remove muitas das matas ciliares e áreas agrícolas, facilitando o processo. Mas no Oeste da Bahia e no norte de Minas Gerais, muitas dessas áreas agrícolas ou de matas ciliares estão acima de 400m, exigindo uma remoção manual, bastante trabalhosa. Outro problema é que uma parte considerável dos BNA já foram desmatados, restando apenas fragmentos isolados de vegetação perenifólia em áreas quase sem vegetação ou, em alguns locais, apenas áreas agrícolas (ver Figura 5).

Para avaliar se uma área agrícola estava dentro ou fora dos limites originais aproximados dos BNA, procuramos pixels com fragmentos de vegetação com altos valores de NDVI nos polígonos que estavam sendo vetorizados e inspecionamos o quão seca ficava aquela área durante a estação seca usando imagens de satélite de anos e meses diferentes disponíveis no software 'Google Earth Pro'. Quando a área ficava mais verde que o entorno durante os meses secos, ou quando havia um fragmento isolado de vegetação que permanecia verde o ano todo na imagem do Google Earth Pro e com alto NDVI em nosso raster, nós incluímos essas áreas desmatadas como parte dos limites dos BNA. Mas, em muitos casos, o desmatamento tornou muito difícil ou talvez impossível resgatar qual o ecossistema original que havia no local. Na dúvida, tentamos fazer uma vetorização conservadora, incluindo nos limites dos polígonos apenas os locais que realmente permaneciam verdes o ano todo. Mas talvez a área original de BNA fosse consideravelmente maior no passado e parte das áreas úmidas tenha sido perdida por desmatamento, resultando em dessecação dos ambientes após o desmatamento ao longo do tempo histórico. A Comissão Científica de Exploração, que passou pelo Ceará entre 1859 e 1860, inclusive, já registrava o processo agressivo de desmatamento em parte dos BNA (Braga 1962), mostrando um processo antigo de degradação.

Para os BNA do Raso da Catarina, na Bahia, na bacia sedimentar do Tucano-Jatobá, também achamos áreas de elevado NDVI que na imagem de alta resolução não permitiram uma avaliação segura sobre o tipo de vegetação. Essas áreas exigiriam visitas de campo e coletas florísticas para definir se têm vínculos biogeográficos mais fortes com a caatinga ou com outros BNA. Mas destacamos que, por inspeção visual nas imagens de satélite e análise do NDVI, parece haver algumas áreas dentro da bacia sedimentar do Tucano-Jatobá que se enquadram como BNA.

Por fim, é importante lembrar que o processo de expansão e retração das matas úmidas, que resultaram no isolamento atual dos BNA em meio ao DBC, é um processo dinâmico (Silveira et al., 2019). Assim, as áreas de BNA não permaneceram estanques ao longo dos milênios. Algumas dessas áreas ainda são muito úmidas e com biota claramente diferente da caatinga. Mas outras áreas são os últimos resquícios das matas úmidas em algumas serras que, embora mais úmidas que a caatinga do entorno, já são atualmente muito mais secas do que provavelmente foram milênios atrás, quando o clima era mais úmido. Com isso, encontramos áreas que possuem uma flora mista, com espécies de matas úmidas muito misturadas com espécies típicas da caatinga. Em algumas dessas áreas, seria defensável tratá-las como áreas de flora mesclada, com espécies de matas úmidas misturadas com espécies comuns na caatinga. Normalmente, essas são áreas pequenas, com menos de 1000 hectares, muito isoladas das áreas maiores de BNA. Elas permanecem com $NDVI \geq 0,7$ na estação seca, mas com muitas interdigitações com a caatinga, deixando as áreas mais úmidas restritas aos fundos de vale, topos de morro e áreas mais protegidas da serra. Ao analisar essas áreas, o leitor deve considerar que parte desses polígonos menores dos BNA precisam de um estudo mais local e, embora devam ser considerados incluídos na proteção da Lei da Mata Atlântica, biogeograficamente eles podem eventualmente ter mais afinidade florística com a caatinga, embora permaneçam mais verdes que o entorno. Esses são pontos a serem respondidos por estudos em escala local, em campo, focados na biota de cada uma dessas áreas, algumas das quais claramente ligadas à Mata Atlântica, enquanto outras já expostas atualmente a climas mais secos.

Uma última limitação do nosso mapeamento a se considerar é que usamos o corte de altitude de 400 m para delimitar o que ia ou não ser mapeado como BNA. Achamos esse um valor razoável, pois os BNA estão de fato associados às serras úmidas. O valor de 400 m é, também, mais adequado que os 600m reportados em outros estudos na literatura, pois em campo verificamos ocorrência de áreas perenifólias ou bem mais verdes que a caatinga nessa faixa de altitude. Entretanto, verificamos que em trechos mais úmidos do barlavento da serra de Baturité, a transição entre matas secas/caatinga e matas úmidas pode descer um pouco abaixo, até 350 ou, possivelmente, até menos, embora seja difícil localizar com certeza essa faixa de transição devido ao desmatamento. Ademais, as linhas cartográficas são uma necessidade humana, mas na natureza essas transições se processam em gradientes. Em alguns trechos das serras, as matas úmidas descem menos, em outros, mais. E esses limites estão hoje alterados pelo desmatamento e queimadas. Para o mapeamento detalhado, em grande escala, de um BNA específico, essas questões podem e devem ser levadas em consideração. Se um pesquisador estiver mapeando uma área individual em grande detalhamento, pode perfeitamente encontrar situações onde os BNA começam apenas em altitudes superiores a 400 m ou situações onde as matas úmidas descem até altitudes abaixo dos 400 m. No barlavento do maciço de Baturité, embora a faixa de transição de caatinga e mata seca para mata úmida estivesse justamente na faixa de 350-400 m, algumas espécies das matas úmidas do BNA desciam pelos vales em áreas que, em tese, poderiam ser mapeadas como vegetação ciliar ou então vegetação de caatinga. Desse modo, lembramos mais uma vez que as linhas

cartográficas são necessidades humanas, mas muitas vezes as biotas não respeitam as linhas cartográficas. Elas são importantes ferramentas, mas não são absolutas e não serão seguidas por todas as espécies em campo.

Outra dificuldade encontrada por nós é que, na Chapada Diamantina, as florestas úmidas passam por transições complexas e difíceis de mapear com os campos rupestres. Há trechos com vegetação florestal em vales úmidos e no barlavento da Chapada que são intercalados com topos de morro com campos rupestres. Essas áreas são muito difíceis de mapear por si só, e algumas vezes ocorrem em trechos antropizados, onde floresta, campo rupestre e áreas desmatadas se misturam, tornando muito difícil a delimitação entre unidades. Fizemos um trabalho dedicado de vetorização da provável extensão das áreas de BNA usando imagens de satélite na escala 1:50.000, mas é possível que haja erros no mapeamento quando inspecionado em escalas maiores, com alto grau de detalhamento.

Assim, consideramos que nosso mapa é o mais completo até o momento, compatível com a escala de 1:250.000 usado pelo IBGE para delimitar a Caatinga, mas chamamos atenção para o fato de que ele não é perfeito e que, considerando que os BNA ocorrem de modo disperso pela Caatinga, em áreas distantes umas das outras, não é possível a um único grupo de pesquisa validar em campo todas as áreas. Ademais, uma dificuldade para o mapeamento é que parte das áreas de BNA foram perdidas por desmatamento, e atualmente não é mais possível ter certeza da sua exata extensão. Além disso, alguns BNA eram manchas contínuas de habitat de maior dimensão, e essas áreas agora estão fragmentadas pelo desmatamento em vários fragmentos de pequeno tamanho.

A tarefa de recriar durante o mapeamento o que devia ser a área original dos BNA antes do desmatamento histórico é difícil, mas, apesar das limitações, cremos que geramos aqui o mapa mais detalhado e abrangente para a distribuição dos BNA até o momento. Todos os arquivos, raster, shapefiles, estão disponíveis para que os pesquisadores criem mapas mais refinados no futuro, baseando-se em nosso estudo.

CONCLUSÕES

Nosso estudo produziu um mapa atualizado dos BNA usando um procedimento que é reprodutível e usa uma árvore de decisão que pode ser replicada e aprimorada em estudos futuros. Os BNA são áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, de grande importância socioambiental dentro do contexto da Caatinga. São ambientes historicamente ameaçados pelo desmatamento, mas que, legalmente, recebem proteção especial da Lei da Mata Atlântica. Vários estudos tentaram, historicamente, mapear a ocorrência dos BNA. Nós damos aqui nossa contribuição, fornecendo o passo a passo metodológico usado e disponibilizando os raster e shapefiles gerados pelo estudo, bem como o mapa e shapefile final, para uso em outros estudos. Sobre nosso estudo, pode-se usar os shapefiles gerados por nós para delimitar com mais detalhes um BNA específico ou, alternativamente, pode-se usar nossos polígonos dos BNA para estudos de conservação e de biogeografia. Esperamos que esse mapeamento seja utilizado para aprofundar o conhecimento sobre os BNA e, especialmente, para ampliar a proteção legal dos mesmos e o seu monitoramento ambiental.

Agradecimentos

Agradecemos à Capes pela bolsa de mestrado da primeira autora. Agradecemos ao Governo do Estado do Ceará e à Secretaria de Meio Ambiente e Mudança do Clima (SEMA) do Ceará, que forneceu recursos, por meio do programa Cientista Chefe de Meio Ambiente do Ceará, para levantamentos de campo no BNA do maciço de Baturité.

Submetido em 13 de julho de 2025.

Aceito para publicação em 03 de março de 2026.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711–728, 2013.
- BATALHA-FILHO, H.; FJELDSÅ, J.; FABRE, P.; MIYAKI, C. Y. Connections between the Atlantic and the Amazonian forest avifaunas represent distinct historical events. **Journal of Ornithology**, v. 154, p. 41-50, 2013.
- BARBOSA, Humberto Alves; HUETE, Alfredo Ramon; BAETHGEN, Walter E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 67, n. 2, p. 288-307, 2006.
- BÉTARD, F.; PEULVAST, J.-P.; CLAUDINO SALES, V. Caracterização morfoedológica de uma serra úmida no semi-árido do Nordeste brasileiro: o caso do maciço de Baturité-CE. **Mercator**, v. 6, p. 107–126, 2007.
- BRAGA, R. **História da Comissão Científica de Exploração**. Fortaleza: Imprensa Universitária do Ceará, 1962.
- BRANCO, M. S. D. et al. Were Dry Forests widespread in the Pleistocene and what is their fate under climate change? A modelling approach using a specialist plant. **Flora**, v. 321, p. 152629, 2024.
- BUENO, M. L. et al. Effects of Quaternary climatic fluctuations on the distribution of Neotropical savanna tree species. **Ecography**, v. 40, n. 3, p. 403-414, 2017.
- BUZATTI, R. S. O. et al. Genetic and historical colonization analyses of an endemic savanna tree, *Qualea grandiflora*, reveal ancient connections between Amazonian savannas and Cerrado core. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1–16, 2018.
- CAMPBELL, James B.; WYNNE, Randolph H. **Introduction to remote sensing**. 5th ed. New York: The Guilford Press, 2011.
- COSTA, G. C. et al. Biome stability in South America over the last 30 kyr: Inferences from long-term vegetation dynamics and habitat modelling. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 3, p. 285–297, 2018.
- COSTA, L. R. F.; MAIA, R. P.; BARRETO, L. L.; SALES, V. C. C. Geomorfologia do Nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, 2020.
- DEVECCHI, M. F. et al. Beyond forests in the Amazon: biogeography and floristic relationships of the Amazonian savannas. **Botanical Journal of the Linnean Society**, p. 478–503, 2020.
- FERNANDES, M. F.; CARDOSO, D.; QUEIROZ, L. P. An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism. **Journal of Arid Environments**, v. 174, p. 104079, 2020.
- FIGUEIREDO, Maria Angélica. A cobertura vegetal do Ceará (Unidades Fitoecológicas). In IPLANCE (Ed.), **Atlas do Ceará**. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará; IPLANCE, 1997.

- GOIS, L. S. D. S.; CORRÊA, A. C. D. B.; MONTEIRO, K. D. A. Análise Integrada dos Brejos de Altitude do Nordeste do Brasil a partir de Atributos Fisiográficos. **Espaço Aberto**, v. 9, n. 2, p. 77–98, 2019.
- HELLDÉN, Ulf; TOTTRUP, Christian. Regional desertification: A global synthesis. **Global and Planetary Change**, v. 64, n. 3-4, p. 169-176, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818108001276>. Acesso em: 6 set. 2023.
- HUANG, Sha *et al.* A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 1-6, 2021.
- IBGE. Mapa da Área de Aplicação da Lei nº 11.428 de 2006. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2006.
- IBGE. Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2019.
- JUNCÁ, Flora A.; FUNCH, Ligia; Rocha, W. **Biodiversidade e conservação da Chapada Diamantina**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005.
- LEDO, R. M. D.; COLLI, G. R. The historical connections between the Amazon and the Atlantic Forest revisited. **Journal of Biogeography**, v. 44, n. 11, p. 2551–2563, 2017.
- MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB, 2012.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE**. Áreas prioritárias para conservação da Caatinga, 2018. Disponível em: https://portal-espacial.sibbr.gov.br/ws/layers/view/more/areas_prioritarias_caatinga_4326_iso88591?lang=pt_BR
- MOGNI, V. Y.; OAKLEY, L. J.; PRADO, D. E. The distribution of woody legumes in neotropical dry forests: the Pleistocene Arc Theory 20 years on. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 72, n. 1, p. 35–60, 2015.
- MORO, M. F. *et al.* Biogeographical Districts of the Caatinga Dominion: A Proposal Based on Geomorphology and Endemism. **The Botanical Review**, v. 90, n. 4, p. 376–429, 2024.
- MORO, M. F. *et al.* Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, v. 66, n. 3, p. 717–743, 2015.
- MORO, M. F.; NIC LUGHADHA, E.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A Phytogeographical Meta-analysis of the Semiarid Caatinga Domain in Brazil. **The Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91–148, 2016.
- MORRONE, J. J. Biogeographical regionalisation of the Neotropical region. **Zootaxa**, v. 3782, n. 1, p. 1–110, 2014.
- NEPOMUCENO, I. V. *et al.* Savannas of the Brazilian semiarid region: what do we learn from floristics? **Acta Botanica Brasilica**, v. 35, n. 3, p. 361–380, 2021.
- NIMER, E. Climatologia da Região Nordeste do Brasil: introdução à climatologia dinâmica. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 34, n. 2, p. 3–51, 1972.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

- OTHMAN, Mohammed Ahmed *et al.* Tropical deforestation monitoring using NDVI from MODIS satellite: A case study in Pahang, Malaysia. **IOP Conference Series: earth and environmental science**, v. 169, p. 1-9, 2018.
- PAIVA, M. P. **Os naturalistas e o Ceará**. Fortaleza: Instituto do Ceará, 2002.
- PÔRTO, K. C.; CABRAL, J. J. P.; TABARELLI, M. **Brejos de altitude em Pernambuco e Paraíba: história natural, ecologia e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004.
- PRADO, D. E. As caatingas da América do Sul. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (Eds.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, p. 3–74, 2003.
- PRADO, D. E.; GIBBS, P. E. Patterns of species distributions in the Dry Seasonal Forests of South America. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 80, n. 4, p. 902–927, 1993.
- QUEIROZ, L. P. *et al.* Diversity and Evolution of Flowering Plants of the Caatinga Domain. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (Eds.). **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Cham: Springer, p. 23–63, 2017.
- SILVA, R. M. A. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semi-árido. **Sociedade e Estado**, v. 18, n. 1–2, p. 361–385, 2003.
- SILVEIRA, M. H. B. *et al.* Pleistocene climatic instability drove the historical distribution of forest islands in the northeastern Brazilian Atlantic Forest. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 527, p. 67–76, 2019.
- SILVERA, A. P. *et al.* Flora of Baturité, Ceará: a Wet Island in the Brazilian Semiarid. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 4, 2020.
- SOUZA, M. J. N.; OLIVEIRA, V. P. V. de. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do Nordeste Brasileiro. **Mercator**, v. 9, n. 5, p. 85–102, 2006.
- TEIXEIRA, L. P. *et al.* How much of the Caatinga is legally protected? **Acta Botanica Brasilica**, v. 35, n. 3, p. 473–485, 2021.
- VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C. **Ecorregiões propostas para o bioma caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste; The Nature Conservancy do Brasil, 2002.
- US GEOLOGICAL SURVEY. **NDVI Foundation for Remote Sensing Phenology**. USGS, 18 nov. 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/ndvi-foundation-remote-sensing-phenology>.
- XIE, Y.; SHA, Z.; YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. **Journal of Plant Ecology**, v. 1, n. 1, p. 9–23, 2008.
- XU, Yang; YANG, Yaping; CHEN, Xiaona; LIU, Yangxiaoyue. Bibliometric Analysis of Global NDVI Research Trends from 1985 to 2021. **Remote Sensing**, v. 14, n. 16, p. 1-20, 2022.
- XUE, Jinru; SU, Baofeng. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of sensors**, v. 2017, p.1-17, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2017/1353691>.

ZAPPI, Daniela C.; MORO, Marcelo Freire; MEAGHER, Thomas R.; NIC LUGHADHA, Eimear. Plant biodiversity drivers in Brazilian campos rupestres: insights from phylogenetic structure. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1–15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02141>.