

O BIOMA CAATINGA E SEU POTENCIAL NA REGULAÇÃO DA TEMPERATURA E DO FLUXO DE CARBONO ATMOSFÉRICO

Yuri Gomes de Souza¹; Denise Santos Saldanha²; Jonas Valdevino de Lima³; Emanoel Souza da Silva⁴

1. Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGE/UFRN). E-mail: yurigomes.s28@gmail.com
2. Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGE/UFRN). E-mail: denisesaldanha.lama@gmail.com
3. Graduando em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DGE/UFRN). E-mail: jonaslima.geo@gmail.com
4. Graduando em Geografia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). E-mail: emanoel1jpp@gmail.com

Resumo

A presente pesquisa objetiva realizar o levantamento altimétrico e de declividade, bem como o uso e cobertura do município de Frei Martinho/PB, buscando compreender o potencial da vegetação na regulação da temperatura e do fluxo de carbono atmosférico local. Os procedimentos metodológicos foram seguidos a partir de três etapas: 1) utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE); 2) aplicação de índices espectrais de vegetação; e 3) classificação e espacialização da relevância de serviços ecossistêmicos. Observou-se que os dados altimétricos variaram entre 346 e 700m e a declividade de plano a escarpado (0% a > 70%). Foram identificadas cinco classes de uso e cobertura da terra, a saber: corpo d'água (0,1%), solo exposto/área urbana (5,8%), vegetação esparsa (49,9%), vegetação semidensa (18,1%) e vegetação densa (26,1%), totalizando 238,7 km². Em termos da espacialização dos serviços, percebeu-se que o sequestro de carbono demonstrou um potencial de relevância entre alta a muito alta em mais de 40% na área, enquanto a mitigação da temperatura apresentou apenas 25,3% neste mesmo intervalo. Complementarmente, os dados revelaram que as áreas com cotas altimétricas e de relevo forte ondulado a escarpado, cuja vegetação demonstrou maior conservação, indicaram concentrar a maior capacidade de oferta em ambos os serviços.

Palavras-chave: Semiárido, cobertura vegetal, serviços ecossistêmicos, conservação.

THE CAATINGA BIOME AND ITS POTENTIAL IN REGULATION OF TEMPERATURE AND ATMOSPHERIC CARBON FLOW

Abstract

The present research aims to carry out an elevation and slope survey, as well as the use and coverage of the municipality of Frei Martinho/PB, seeking to understand the potential of vegetation in regulating temperature and local atmospheric carbon flow. The methodological procedures were followed in three stages: 1) use of the Digital Elevation Model (MDE); 2) application of vegetation spectral indices; and 3) classification and spatialization of the relevance of ecosystem services. It was observed that the altimetric data varied between 346 and 700m and the slope varied from flat to steep (0% to > 70%). Five classes of land use and cover were identified, namely: water body (0.1%), exposed soil/urban area (5.8%), sparse vegetation (49.9%), semi-dense vegetation (18.1%) and dense vegetation (26.1%), totaling 238.7 km². In terms of the spatialization of services, it was noticed that carbon sequestration demonstrated a high to very high potential relevance of more than 40% in the area, while temperature mitigation presented only 25.3% in this same range. In addition, the data revealed that areas with high altitudes and strong undulating to steep relief, whose vegetation demonstrated greater conservation, indicated that they concentrated the greatest supply capacity in both services.

Key words: Semi-arid, vegetation cover, ecosystem services, conservation.

EL BIOMA CAATINGA Y SU POTENCIAL EN REGULACIÓN DE TEMPERATURA Y FLUJO DE CARBONO ATMOSFÉRICO

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo realizar un estudio de elevación y pendiente, así como del uso y cobertura del municipio de Frei Martinho/PB, buscando comprender el potencial de la vegetación en la regulación de la temperatura y el flujo de carbono atmosférico local. Los procedimientos metodológicos se siguieron en tres etapas: 1) uso del Modelo Digital de Elevación (MDE); 2) aplicación de índices espectrales de vegetación; y 3) clasificación y espacialización de la relevancia de los servicios ecosistémicos. Se observó que los datos altimétricos variaron entre 346 y 700 m y la pendiente varió de plana a pronunciada (0% a > 70%). Se identificaron cinco clases de uso y cobertura del suelo, a saber: cuerpo de agua (0,1%), suelo expuesto/área urbana (5,8%), vegetación escasa (49,9%), vegetación semidensa (18,1%) y vegetación densa (26,1%), totalizando 238,7 km². En términos de espacialización de los servicios, se observó que el secuestro de carbono demostró una relevancia potencial de alta a muy alta de más del 40% en el área, mientras que la mitigación de la temperatura presentó solo el 25,3% en este mismo rango. Además, los datos revelaron que las zonas con gran altitud y fuerte relieve ondulado a escarpado, cuya vegetación demostró mayor conservación, indicaron que concentraban la mayor capacidad de oferta en ambos servicios.

Palabras-clave: Semiárido, cobertura vegetal, servicios ecosistémicos, conservación.

INTRODUÇÃO

Com uma extensão total de 912,5 km² e situado na região Semiárida, o Bioma Caatinga apresenta características endêmicas do território brasileiro, não sendo encontrado em qualquer outra parte do Planeta. Esses ambientes, são marcados pela presença de espécies xerófitas de baixo e médio porte, cuja distribuição é predominantemente influenciada pelo clima, relevo e embasamento geológico, encontradas, sobretudo, nas vastas superfícies interplanálticas e de depressões sertanejas (Prado *et al.*, 2003; Tabarelli *et al.*, 2018).

Em termos gerais, a diversidade na Caatinga é caracterizada por mais de duas mil espécies, sendo rica em recursos energéticos – quando comparados a outras regiões influenciadas pela semiaridez (Queiroz, 2011). Pesquisas recentes têm destacado a importância significativa da sua cobertura vegetal na regulação das mudanças climáticas globais, especialmente no que tange sua contribuição à captura de carbono e à regulação da temperatura terrestre (Morais *et al.*, 2017; Araújo Filho *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2023).

Entretanto, a apropriação desordenada do uso e cobertura da terra nessas áreas tem suscitado modificações graves na dinâmica dos seus recursos naturais. Dados demonstram que este Bioma tem sido apontado como o terceiro mais degradado do Brasil, estando atrás apenas do Cerrado e da Floresta Atlântica, cujos ecossistemas já foram alterados entre 30,4% a 51,7% (Leal *et al.*, 2005; Antongiovanni *et al.*, 2020). Em estudo recente, Araújo *et al.* (2023) atestam que 89% da Caatinga foi convertida pelas forças motrizes humanas, e atualmente, estima-se que restam apenas 11% da sua fitofisionomia original, sendo pouco mais de 4%, deste percentual, em forma de floresta.

Nesse contexto, o manejo inadequado somado à exploração animal e ao extrativismo vegetal predatório, têm levado não apenas à redução da biodiversidade (Maia *et al.*, 2017), mas, sobretudo, à susceptibilidade ao processo de desertificação (Souza, 2023), assim como à

crescente tendência à perda superficial de solo (Oliveira *et al.*, 2023a) e ao consequente aumento das emissões de carbono (Oliveira *et al.*, 2023b).

Diante dessa problemática, a abordagem dos serviços ecossistêmicos, normalmente caracterizados como as propriedades, funções e processos ecológicos que promovem o bem-estar humano (Costanza, 2020), vêm sendo empregadas como uma ferramenta diagnóstica e propositiva para promover a conservação desses ambientes, especialmente por permitir classificar e espacializar o potencial de benefícios ofertados pela Caatinga. Isso fica evidente quando artigos recentes enfatizam sua relevância, tanto no âmbito da regulação da temperatura como do carbono (Gomes *et al.*, 2021; Oliveira; Guedes; Costa, 2022).

Quanto à área de estudo, por se tratar de um município localizado no Semiárido paraibano sob influência adjacente do “Núcleo do Seridó” - área-piloto 3 do “Polígono das Secas” (Perez-Marin *et al.*, 2012), e ciente de alguns problemas ambientais decorrentes principalmente da histórica atividade mineradora (ex. desmatamento, perda da biodiversidade) (Bezerra *et al.*, 2020), a avaliação da cobertura vegetal da região na prestação de serviços ecossistêmicos reguladores demonstra ser uma necessidade inadiável, especialmente por se fundamentar como uma contribuição científica no âmbito das mudanças climáticas (IPCC, 2018).

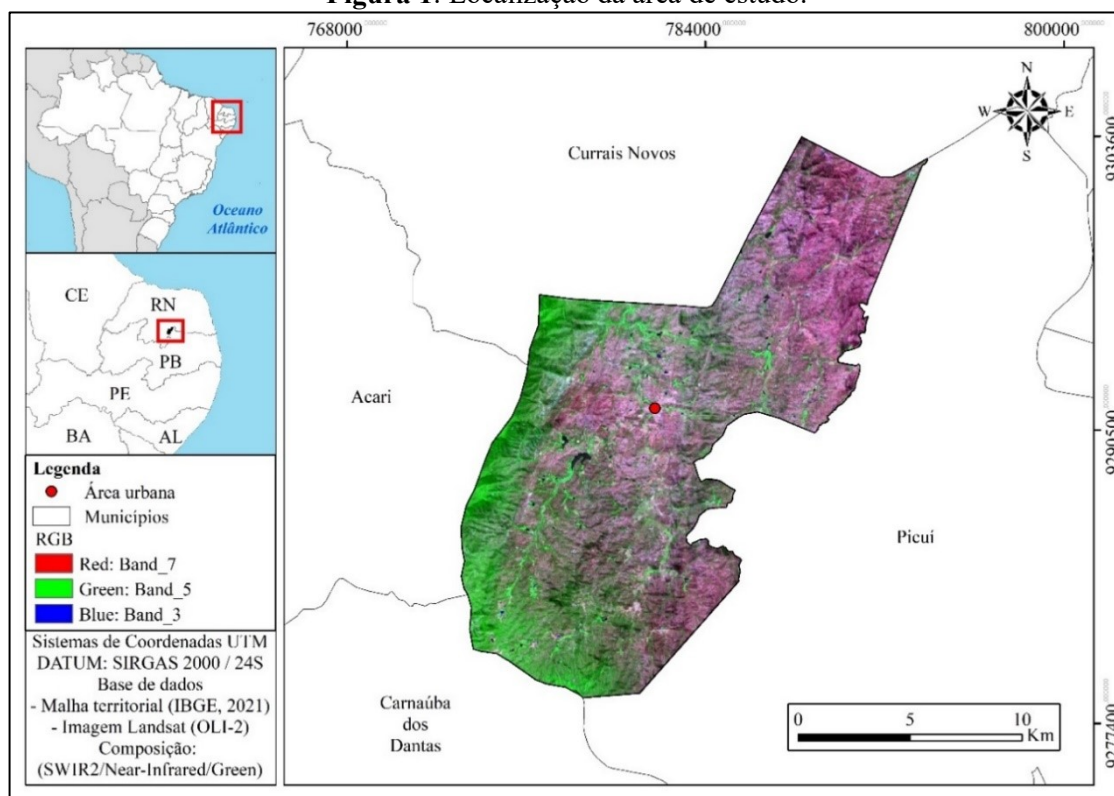
Assim, a presente pesquisa objetiva realizar o levantamento altimétrico e de declividade, bem como o uso e cobertura do município de Frei Martinho/PB, buscando compreender o potencial da vegetação na regulação da temperatura e do fluxo de carbono atmosférico local.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área escolhida para desenvolver essa pesquisa foi o município de Frei Martinho, localizado nas regiões intermediária de Campina Grande e imediata de Cuité – Nova Floresta, ambas inseridas no estado da Paraíba, Brasil (Figura 1). Com 238,7 km², o mesmo encontra-se nas coordenadas UTM 781824.15 m E e 9291253.82 m S, precisamente entre os municípios de Acari/RN, Carnaúba dos Dantas/RN, Currais Novos/RN e Picuí/PB (IBGE, 2021).

Figura 1: Localização da área de estudo.



Fonte: Acervo da pesquisa (2023).

No que concerne o contexto climático, a região está sob a influência do clima Semiárido Tropical quente e seco (tipo BSh), segundo classificação climática de Köppen, possuindo uma temperatura média anual de $\cong 28^\circ\text{C}$ e com níveis pluviométricos inferiores a 700 mm ($\cong 630$), os quais são concentrados entre os meses de fevereiro a maio (Alvares *et al.*, 2013; INMET, 2018).

Configurada na província geológica do Planalto da Borborema e na subprovíncia Seridó, a área situa-se no domínio geomorfológico dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos, abrangendo as seguintes unidades morfológicas: Encostas Orientais do Planalto da Borborema, Pediplano Central do Planalto da Borborema e as Serras Ocidentais do Planalto da Borborema. Quanto ao contexto pedológico, os Neossolos aparecem de maneira predominante – cuja subordem se apresenta por meio dos Neossolos líticos (BRASIL, 2023).

Em termos da fitogeografia local, o município está inserido no Domínio Morfoclimático da Caatinga ou no “Domínio dos Sertões Secos” (Ab’Sáber, 2003), e como resultado, possui uma floresta característica de ambientes semiáridos – as intituladas xerofíticas, podendo ocorrer de porte arbustivo a arbóreo, bem como herbáceo, a partir da ocorrência de cactáceas e bromeliáceas (Prado, 2003; Tabarelli *et al.*, 2018). Complementarmente, tendo como classificação Savana-Estépica Arborizada (BRASIL, 2023), a área dispõe de algumas espécies nativas relevantes, segundo Bezerra *et al.*, (2020), são elas: Angico (*Piptadenia macrocarpa* Benth.), Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul.); Juazeiro (*Ziziphus joazeiro* Mart.); Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* Willd. Poir.); Marmeleiro (*Croton sonderianus* Muell. Arg.); e Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* L.).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Processamento dos dados espectrais

Modelo Digital de Elevação (MDE)

A utilização de um MDE (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 m, adquirido em ambiente do *Google Earth Engine* (GEE) sob a função “`ee.Image("USGS/SRTMGL1_003")`”, permitiu espacializar a hipsometria, por meio da execução do algoritmo “fill” (*Spatial Analyst*) - que corrige eventuais ruídos e/ou erros da matriz *raster*. Em seguida, extraiu-se a declividade, utilizando-se do atributo *slope* (*Spatial Analyst*) cuja segmentação do gradiente de inclinação se deu em valores percentuais (%). A partir dos dados de inclinação, foi utilizada a classificação sugerida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979) para estabelecer as classes de relevo na área de estudo (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação do relevo com base nos valores de declividade.

Relevo	Declividade (%)
Plano	0-2
Suave-ondulado	2-5
Ondulado	5-10
Moderadamente ondulado	10-15
Forte-ondulado	15-45
Montanhoso	45-70
Escarpado	>70

Fonte: EMBRAPA (1979).

Além disso, realizou-se a extração da rede de drenagem com base na execução do banco de algoritmos “*hydrology*”, os quais foram representados pelas funções de “direção do fluxo” e “acumulação do fluxo”, seguido da aplicação da equação condicional sob a atribuição do valor: “*value* > 100”. Posteriormente, foi realizada a transformação de tais dados em polígonos (*.shp*). Os procedimentos citados anteriormente, assim como a construção e confecção dos dados seguintes (produtos espectrais e mapas) foram auxiliados pela ferramenta do Sistema Geográfico de Informação *ArcMap/ARCGIS* v.10.5 (*ESRI*®), licenciado para o Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – PPGE/UFRN).

Índices espectrais de vegetação

Para a construção dos dados de uso e cobertura e dos serviços ecossistêmicos na área de estudo, foi utilizada uma cena do Landsat 9, acoplado com sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) de resolução espacial de 30 m e 100 m, respectivamente, cuja data de aquisição foi de 01/05/2022, com órbita-ponto 215/064. Esta imagem *raster*, inicialmente, foi reprojeta para o sistema de coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*) – Datum SIRGAS 2000 / Zona 24S e submetida à correção e ao cálculo de reflectância de superfície com o algoritmo *Dark Object Subtraction* (DOS1), inserido no *Semi-Automatic Classification Plugin* do Qgis 3.22.9. A seleção das bandas corrigidas foi guiada com base nos índices apresentados a seguir (Congedo, 2016; USGS, 2023).

Cinco índices foram adotados para aferir as características de cobertura, a saber: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (sigla em inglês: NDVI) (Rouse *et al.*, 1973), Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) (Gamon; Peñuelas; Field, 1992; Rahman *et al.*, 2001); Índice de Reflectância Fotoquímica Melhorado (sPRI) e Índice de Fluxo de Carbono (CO₂Flux) (Rahman *et al.*, 2001; Silva; Baptista, 2015), bem como a equação referente à Temperatura de Superfície Terrestre (TST) (USGS, 2023).

Nesse contexto, com auxílio da calculadora *raster*, foi calculado o NDVI – mediante à razão matemática entre dois parâmetros espectrais (resolução espacial de 30 m): as reflectâncias (R_{λ}) do infravermelho-próximo (banda 5: 0,85 - 0,88 μm) e vermelho (banda 4: 0,64 - 0,67 μm). Por se tratar de um índice que permite compreender o uso da terra em termos da presença/ausência e densidade de dossel florestal, seu intervalo de resposta varia entre -1 e 1 (Rouse *et al.*, 1973; Huete, 2013).

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}}}$$

Para sistematizar a classificação do uso e cobertura da terra à luz dos valores amostrais do NDVI, adotou-se as seguintes classes: corpo d'água (-0,45 - 0); solo exposto/área urbana (0,01 - 0,30); vegetação esparsa (0,31 - 0,50); vegetação semidensa (0,51 - 0,60); e vegetação densa (0,61 - 0,89) (Ballén *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2020).

Objetivando o cálculo do CO₂Flux, dois índices necessitaram ser calculados: o PRI e o sPRI. Primeiramente, ressalta-se que o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) demonstra a medida de capacidade quanto à utilização da energia da luz pela vegetação, sendo entendido muita das vezes como um indicador de eficiência fotossintética – parâmetro essencial para a modelagem da vegetação na absorção de carbono atmosférico. A sua equação corresponde à razão das reflectâncias (R_{λ}) do azul (0,450 - 0,51 μm) e do verde (0,53 - 0,59 μm) (Gamon; Peñuelas; Field, 1992; Rahman *et al.*, 2001; Huete, 2013).

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{BLUE}} - R_{\text{GREEN}}}{R_{\text{BLUE}} + R_{\text{GREEN}}}$$

Sequencialmente, realizou-se uma “normalização dos dados” do PRI a partir da equação do Índice de Reflectância Fotoquímica Melhorado (sPRI), o qual adequa os dados negativos para positivo – variando de 0 a 1. Como resultado, espera-se uma proporcionalidade onde quanto maior o valor, mais elevada representa a eficiência fotossintética da copa. Seu cálculo corresponde à soma entre o PRI e 1, sob a razão de 2, (Rahman *et al.*, 2001; Silva; Baptista, 2015).

$$\text{sPRI} = \frac{\text{PRI} + 1}{2}$$

Portanto, o Índice de Fluxo de Carbono (CO₂flux) constituiu o produto entre os índices NDVI e sPRI (Rahman *et al.*, 2001; Silva; Baptista, 2015). Esse índice, permite estimar uma tendência quanto à absorção do fluxo de CO₂ nas áreas sob potencial fotossintético, isto é, as áreas com maiores níveis de conservação (vegetação com atividade fotossintética ativa) apresentam valores elevados e, consequentemente, maior capacidade de retenção de carbono.

$$\text{CO2flux} = \text{NDVI} * \text{sPRI}$$

Em se tratando da Temperatura de Superfície Terrestre (TST), sua aferição se deu a partir da amostragem em radiação térmica da banda 10 (10.6 - 11.19 μm) oriunda do Landsat 9 (sensor: TIRS 1), datada de 01/05/2022 e resolução espacial de 100 m. Utilizando-se dos dados espectrais e dos metadados desta coleção, realizou-se o cálculo da radiação a partir da seguinte equação (Coelho; Correa, 2013; USGS, 2023).

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{\text{cal}} + A_L$$

Onde, L_{λ} , consiste na radiação espectral; M_L , representa o fator de multiplicativo da banda 10 (3.8000E-04); A_L , o fator aditivo da banda 10 (0.10000); e Q_{cal} , os números digitais calibrados.

Considerada robusta e uma importante alternativa à investigação da temperatura terrestre, a equação a seguir vem demonstrar a razão entre os dados de radiação espectral e as constantes de conversão térmica, tendo seu resultado ajustado para grau celsius ou centígrados ($^{\circ}\text{C}$) – a partir da subtração de 273,15 (Coelho; Correa, 2013; USGS, 2023).

$$T = \left(\frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right)} \right) - 273,15$$

Onde, T , representa a temperatura de brilho do topo da atmosfera ($^{\circ}\text{C}$); L_{λ} , a radiação espectral; e $K_1 = 799.0284$ e $K_2 = 1329.2405$, as duas constantes de conversão térmica encontrada no metadados da imagem.

Classificação dos serviços ecossistêmicos e aplicação da matriz de relevância

Considerando os dados construídos anteriormente, a classificação dos serviços foi balizada mediante à Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos – CICES v. 5.1 (<https://cices.eu/>) (Haines-Young; Potschin, 2018). A representação espacial dos SE foi realizada por meio da matriz de relevância na prestação de serviços e seu gradiente de cores, de acordo com a proposta metodológica encontrada em Burkhard *et al.* (2009) e Burkhard e Maes (2017). Para a segmentação de cada uma das classes de SE, atribuiu-se, a partir dos resultados encontrados nos índices espectrais supracitados, cinco níveis de capacidade e relevância, os quais são categorizados hierarquicamente da seguinte forma: baixa (1); relevante (2); média (3); alta (4); e muito alta (5) (Tabela 2).

Tabela 2: Matriz de relevância para os serviços de regulação e manutenção classificados.

Parâmetros de relevância	Fluxo de carbono (CO ₂ flux)	Temperatura de Superfície Terrestre (TST °C)
Baixo (1)	-0,44 – 0,00	30,4 – 31,3
Relevante (2)	0,22 – 0,27	29,9 – 30,3
Médio (3)	0,28 – 0,33	29,3 – 29,8
Alto (4)	0,34 – 0,41	28,6 – 29,2
Muito alto (5)	0,42 – 0,57	27,2 – 28,5

Fonte: Adaptado de Burkhard e Maes (2017). Dados: Acervo da pesquisa (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram representados através de produtos cartográficos que incluem dados de altimetria, declividade e cobertura da terra do município de Frei Martinho/PB. Além disso, pôde-se também obter as estimativas sobre a atividade fotossintética da vegetação e seus desdobramentos na capacidade de regulação do fluxo de carbono e da temperatura.

Quanto aos dados altimétricos e de declividade, verificou-se que o primeiro dispôs de uma variação de aproximadamente 346 a 700 m entre suas cotas. Em termos do segundo, percebeu-se que o relevo varia entre plano e escarpado, com percentuais de 0% a > 70%, respectivamente.

Nessa estimativa, a classe com maior ocorrência foi a ondulado (5 – 10%), com 73,8 km² (30,9%) da área; em seguida, aparecem as áreas de forte ondulado (15 – 45%) estendendo-se por 60,6 km² (25,4%), suave-ondulado (2 – 5%) por 44,1 km² (18,5%), moderadamente ondulado (10 – 15%) por 43,5 km² (18,2%), plano (0 – 2%) por 14,3 km² (6%), montanhoso (45 – 70%) por 2,3 km² (0,96%) e escarpado (> 70%), com apenas 0,1 km² (0,04%) (Tabela 3).

Tabela 3: Quantificação das classes de relevo a partir da declividade em Frei Martinho-PB.

Declividade (%)	Áreas (km ²)	%
Plano (0 – 2)	14,3	6
Suave-ondulado (2 – 5)	44,1	18,5
Ondulado (5 – 10)	73,8	30,9
Moderadamente Ondulado (10 – 15)	43,5	18,2
Forte-ondulado (15 – 45)	60,6	25,4
Montanhoso (45 – 70)	2,3	0,96
Escarpado (> 70)	0,1	0,04
Total	238,7	100

Fonte: Acervo da pesquisa (2023).

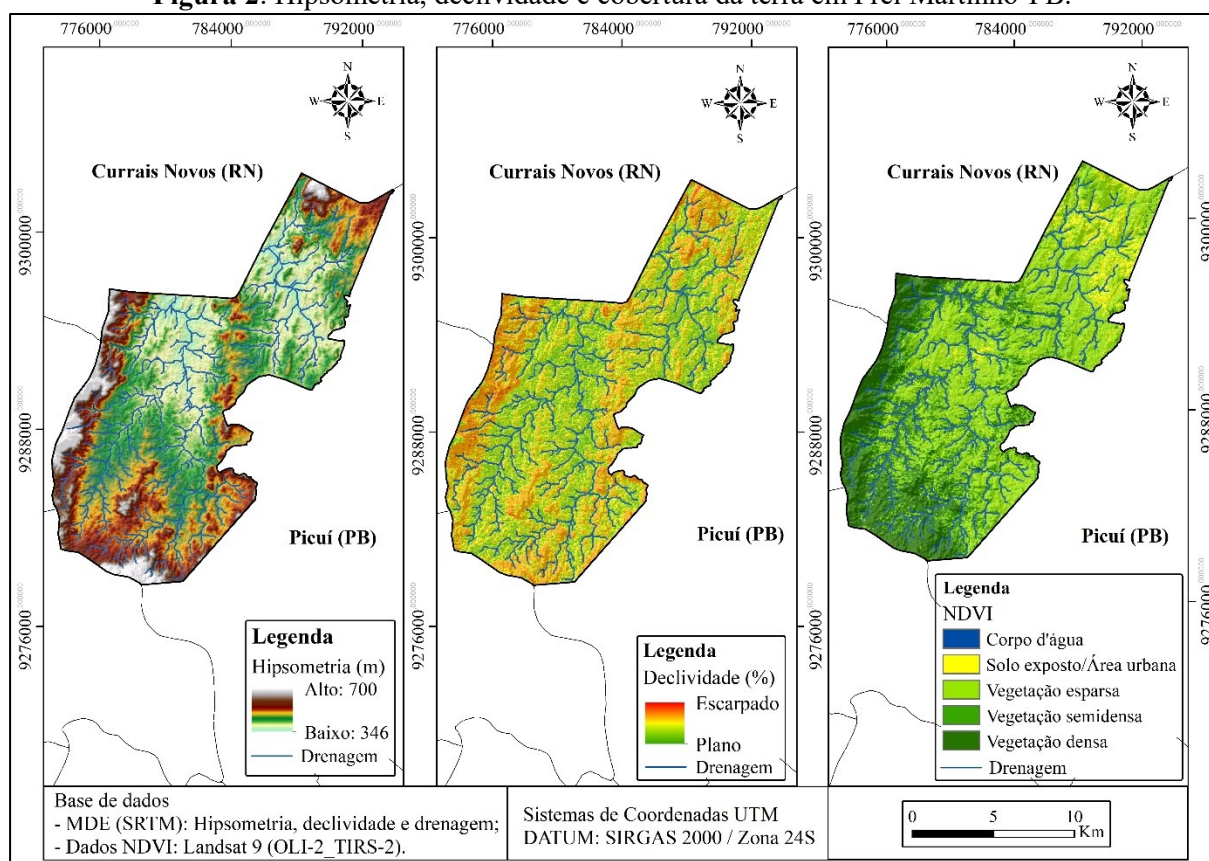
Na cobertura da terra, observou-se que a área possui um total de ocupação de 238,7 km². As classes que apresentaram maiores extensões foram a de vegetação esparsa, com 119,2 km² (49,9%), seguido da vegetação densa, com 62,2 km² (26,1%), vegetação semidensa com 43,2 km² (18,1%), solo exposto/área urbana com 13,9 (5,8%) e corpo d'água, com apenas 0,2 km² (0,1%) (Tabela 4; Figura 2; Figura 3).

Tabela 4: Quantificação das classes de cobertura da terra em Frei Martinho-PB.

Classe	NDVI	Área (km²)	(%)
Corpo d'água	-0,45 – 0,0	0,2	0,1
Solo exposto/Área urbana	0,01 – 0,30	13,9	5,8
Vegetação esparsa	0,31 – 0,50	119,2	49,9
Vegetação semidensa	0,51 – 0,60	43,2	18,1
Vegetação densa	0,61 – 0,89	62,2	26,1
Total		238,7	100

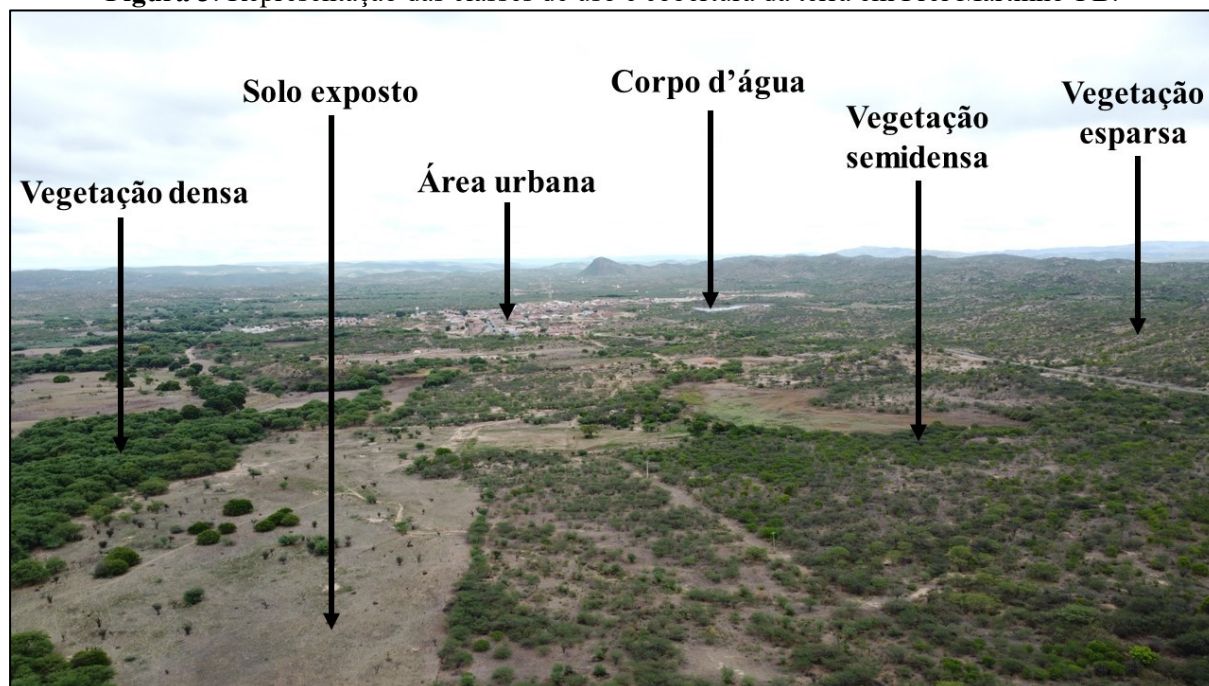
Fonte: Acervo da pesquisa (2023).

Figura 2: Hipsometria, declividade e cobertura da terra em Frei Martinho-PB.



Fonte: Acervo da pesquisa (2023).

Figura 3: Representação das classes de uso e cobertura da terra em Frei Martinho-PB.



Fonte: Acervo da pesquisa (2023).

Ao considerar a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES), foi possível observar os serviços ecossistêmicos de sequestro de carbono e mitigação da temperatura terrestre, os quais foram classificados na divisão “regulação de condições físicas, químicas e biológicas”, no grupo “composição e condições atmosféricas” e nas classes de “regulação da composição química da atmosfera e dos oceanos” e “regulação da temperatura e umidade, incluindo ventilação e transpiração”, respectivamente (Quadro 1; Haines-Young; Potschin, 2018).

Quadro 1: Classificação dos serviços ecossistêmicos de regulação e manutenção no município de Frei Martinho/PB.

Seção	Divisão	Grupo	Classe	Serviço
Regulação e Manutenção (Biótica)	Regulação de condições físicas, químicas e biológicas	Composição e condições atmosféricas	Regulação da composição química da atmosfera e dos oceanos	Sequestro de carbono
			Regulação da temperatura e umidade, incluindo ventilação e transpiração	Mitigação da temperatura terrestre

Fonte: Adaptado de Haines-Young e Potschin (2018).

Assim, por meio das equações espectrais (CO_2 flux e TST) e a vegetação, identificou-se que ambos apresentaram intervalos amostrais entre -0,23 - 0,57 e 27,2 - 31,3 °C, respectivamente. No que se refere ao primeiro, observou-se que a classe 0,23 e 0,30 foi a de maior representatividade espacial, com 76,1 km² (31,9%), seguida das classes 0,11 e 0,10, com 62,9 km² (26,4%); 0,31 e 0,38, com 57,3 km² (24%); 0,39 e 0,57, com 41,4 km² (17,3%); e - 0,23 e 0,10, com apenas 0,4 km² (0,1%). No que tange o segundo, o intervalo 29,9 - 30,3 °C indicou a maior ocupação na área, com 70,1 km² (29,4%), prosseguindo, nessa ordem, com as classes 29,3 e 29,8 °C, com 59 km² (24,7%); 30,4 e 31,3 °C, com 49,3 km² (20,7%); 28,6 e 29,2 °C, com 34,4 km² (14,4%); e 27,2 e 28,5 °C, com 26,1 km² (10,9%) (Tabela 5 e Figura 4).

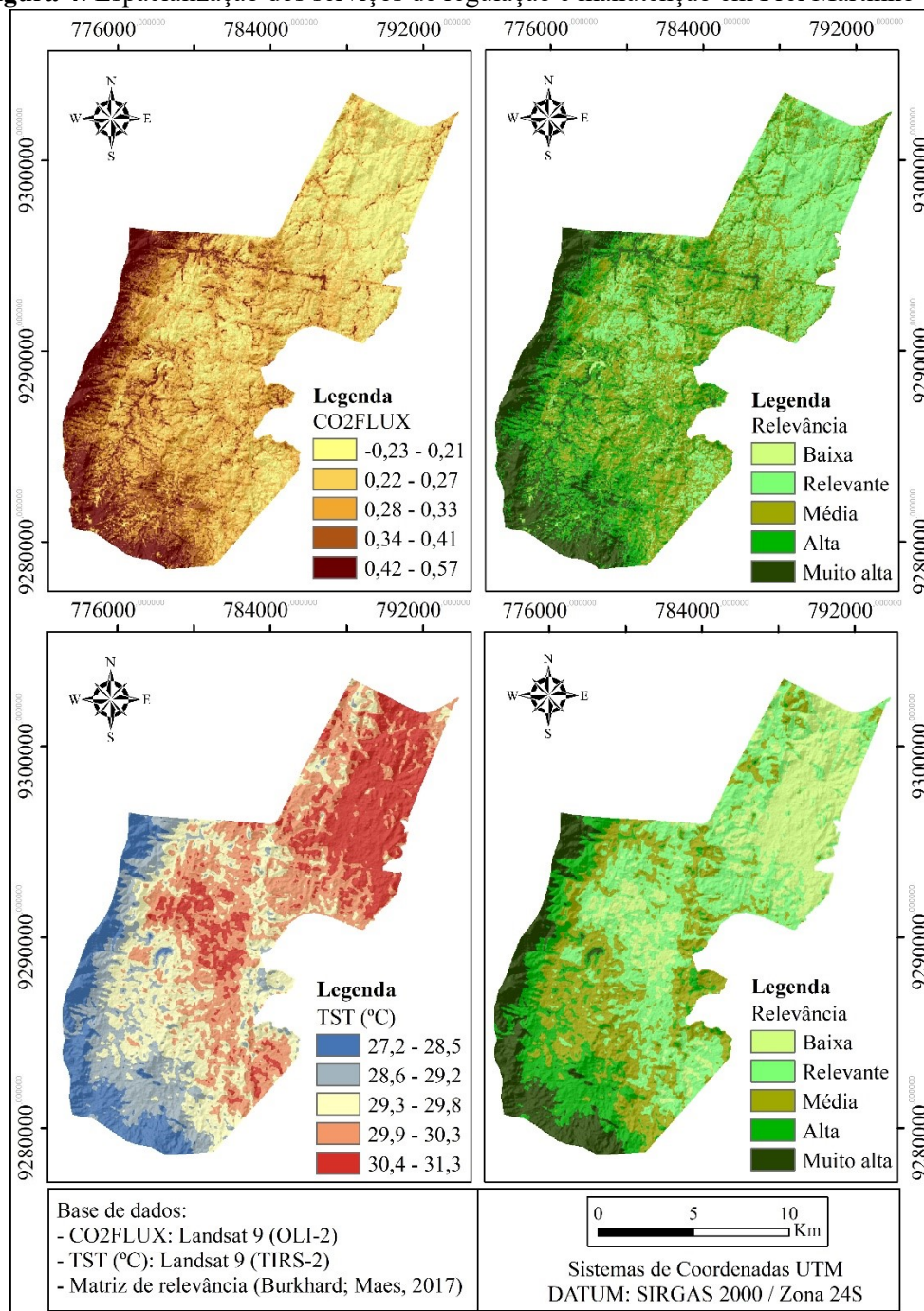
Considerando as expressões numéricas e a matriz de relevância, notou-se que o CO₂flux indicou a existência de 0,1% do município com baixa capacidade de ofertar sequestro de carbono. Contudo, a classe relevante apareceu com 26,5% do potencial, seguido pela média com 31,9%, a alta com 24,1% e muito alta, com 17,4%. A TST, demonstrou que a área apresenta 20,7% como baixa capacidade na mitigação da temperatura, 29,4% como relevante, enquanto média com 24,6%, alta com 14,4% e muito alta com 10,9% (Tabela 5; Figura 4).

Tabela 5: Quantificação dos dados espectrais para o município de Frei Martinho-PB.

Índices	Intervalos	Áreas (km²)	Capacidade	%
CO ₂ flux	-0,33 – 0,10	0,4	Baixa	0,1
	0,11 – 0,22	62,9	Relevante	26,5
	0,23 – 0,30	76,1	Média	31,9
	0,31 – 0,38	57,3	Alta	24,1
	0,39 – 0,57	41,4	Muito alta	17,4
TST (°C)	27,2 – 28,5	26,1	Muito alta	10,9
	28,6 – 29,2	34,4	Alta	14,4
	29,3 – 29,8	59	Média	24,6
	29,9 – 30,3	70,1	Relevante	29,4
	30,4 – 31,3	49,3	Baixa	20,7
Total	-	238,7	-	100

Fonte: Acervo da pesquisa (2023).

Figura 4: Espacialização dos serviços de regulação e manutenção em Frei Martinho-PB.



Fonte: Acervo da pesquisa (2023).

Diante disso, ao correlacionar os valores altimétricos e de declividade com a cobertura da terra, foi possível observar que as áreas com maiores cotas altimétricas (superior a 500 m) e de relevo forte ondulado a escarpado (classes > 15%) foram mais propensas à presença de vegetação semidensa a densa (classes entre 0,51 e 0,89). Em contrapartida, as áreas com altitude inferiores a 500 m e com relevo plano a moderadamente ondulado (declividade < 15%) dispuseram de uma maior presença de vegetação esparsa, solo exposto/área urbana, assim como dos corpos d'água (classes entre -0,45 e 0,50).

Complementarmente, notou-se uma relação importante entre os dados de NDVI e CO₂flux, uma vez que os trechos com ocorrência de vegetação semidensa a densa (0,51 - 0,89) esteve estreitamente associada à eficiência fotossintética, cuja concentração de fluxo de carbono demonstrou ser superior (intervalo: 0,31 a 0,57). Em se tratando da TST, essa também indicou uma concentração de temperaturas baixas (intervalo: 27,2 a 29,2 °C) nas áreas de maciços com maiores cotas altimétricas, onde acredita-se ter uma vegetação em maior conservação.

Corroborando com os resultados apresentados anteriormente, Silva *et al.* (2018) identificaram valores para o CO₂flux entre -0,10 a 0,31, de modo que valores positivos e próximos a 0,31 representaram os dosséis potencialmente saudáveis e com fluxo de carbono ativo. Já os valores negativos e próximos a 0, por outro lado, suscitaram nas regiões de menor atividade fotossintética da vegetação, com consequente diminuição de captura deste elemento atmosférico.

No Bioma Caatinga, Morais *et al.* (2017), considerando a sazonalidade climática regional, perceberam que as plantas, especialmente no período seco, tendem a reduzir sua dinâmica fotossintética e por consequência sua função reguladora de CO₂, em virtude da perda natural das folhas (caducifolia). Entretanto, durante o período chuvoso, ao manter a plena atividade da clorofila (presença de folhas vigorosas), os números apontam que o potencial de fluxo de CO₂ aumenta potencialmente.

Ainda nesse contexto, Santos *et al.* (2023) trazem uma contribuição fundamental para essas áreas de Caatinga preservada e em sucessão ecológica, principalmente por enaltecer a determinação do fluxo de CO₂ e suas mudanças sazonais. Ao realizarem o monitoramento com torre micrometeorológica, os autores perceberam uma forte similaridade com os dados do sensor OLI (Landsat-8), chegando a uma conclusão que mais de 70% dos indicativos do índice CO₂flux responde ao potencial de fluxo de carbono localmente.

Adicionalmente, Pavão *et al.* (2015) observaram que em regiões onde há presença de cobertura vegetal conservada, as temperaturas tendem a possuir valores mais baixos. Corroborando com esta afirmação, Jesus e Santana (2017) analisaram a TST em diferentes meses do ano, e notaram que durante o período chuvoso a temperatura era mais amena em comparação com o período seco, uma vez que, exatamente nas áreas que haviam influência de vegetação rasteira e solo exposto, os valores espectrais se elevavam.

Além disso, Rosa e Faria Filho (2023) também ratificam esse papel regulador da vegetação, ao realizarem pesquisas na região urbana de Rio Paranaíba (MG). Considerando a ocorrência de valores baixos de NDVI em trechos urbanos com temperatura elevada, os autores perceberam uma redução média de 0,71 °C em áreas com presença florestal, suscitando afirmar que estes remanescentes verdes podem potencializar, definitivamente, a mitigação das altas temperaturas e ofertar conforto térmico localmente.

Dessa forma, entende-se que enaltecer a relevância da cobertura vegetal da Caatinga consiste em não apenas contribuir para a conservação deste Bioma submetido a eventos degradantes históricos (ex. desmatamento), mas sobretudo potencializar positivamente sua atividade no ciclo do carbono, pois, para que seus bosques, uma vez desmatado, venham a recompor metade da sua capacidade estocada, serão necessários pelo menos 30 anos (Araújo Filho *et al.*, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As imagens de satélites e as equações espectrais permitiram realizar estimativas para o CO₂flux e a TST por meio da cobertura da terra no município de Frei Martinho-PB. Com base nesses dados e utilizando-se a CICES, pôde-se constatar a presença dos serviços de regulação e manutenção de sequestro de carbono e de mitigação da temperatura terrestre. As áreas com cotas altimétricas e de relevo forte ondulado a escarpado, cuja vegetação demonstrou maior conservação, indicaram concentrar a maior capacidade na oferta de ambos os SE.

Desse modo, espera-se que este artigo possa auxiliar o planejamento e a tomada de decisão dos agentes públicos locais, buscando, através disso, fornecer uma ferramenta teórica que auxilie uma avaliação inicial do potencial da cobertura vegetal, especialmente no que tange à sua plena conservação. Entretanto, entende-se que nas regiões mais baixas e planas ocorreu uma maior propensão às atividades humanas degradantes, o que acredita-se minimizar e/ou comprometer o fornecimento natural desses SE no curto e longo prazo. Com isso, além de novas pesquisas, sugere-se que sejam realizados monitoramentos via satélite da cobertura ao longo das próximas décadas, a fim de compreender a dinâmica florestal e o possível aumento de áreas com solo exposto; ademais, que se estabeleça um projeto municipal para o levantamento fitogeográfico das espécies nativas ainda existentes.

REFERÊNCIAS

- AB' SABER, Aziz. **Os domínios de Natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 144 p.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 2013, p. 711-728.
- ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; MATSUMOTO, M.; FONSECA, C. R. Chronic anthropogenic disturbance on Caatinga dry forest fragments. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 10, 2020.
- ARAUJO, H. F. P.; CANASSA, N. F.; MACHADO, C. C. C.; TABARELLI, M. Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 1-11, 27 out. 2023.
- ARAÚJO FILHO, R. N.; FREIRE, M. B. G. S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, 407, 210–220, 2018.
- BALLÉN, L. A. C.; SOUZA, B. I. de; LIMA, E. R. V. de. 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, 9 dez. 2016.
- BEZERRA, J. J. L.; LIRA, W. B.; SILVA, T. da. C. Impactos ambientais causados pela mineração: uma análise da percepção de pequenos mineradores do município de Frei Martinho-PB. **Revista Monografias Ambientais**, v.19, n. 7, 2020.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Banco de informações Ambientais; 2023. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 15/12/2023.

- BURKHARD, B.; KROLL, F.; MÜLLER, F.; WINDHORST, W. Landscapes capacities to provide ecosystem services - a concept for land-cover based assessments. **Landscape Online**, v. 15, p. 1-22, 1 dez. 2009.
- BURKHARD, B.; MAES, J. **Mapping Ecosystem Services**. Sofia: Pensoft Publishers, 2017.
- CONGEDO, L. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Versão 5.1.0.1. Tutorial**. 2016. Disponível em: https://semiautomaticclassificationmanualv5.readthedocs.io/_/downloads/ar/latest/pdf/. Acesso em: 14 dez. 2023.
- COSTANZA, R. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability. **Ecosystem Services**, v. 43, n. 101096, p.1-7, 2020.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. Rio de Janeiro: SNLCS, 1979. 83 p.
- GAMON, J. A.; PENUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n. 1, p. 35-44, 1992.
- GOMES, D. S.; SANTOS, S. K.; SILVA, J. H. C. S.; SANTOS, T. M.; SILVA, E. V.; BARBOSA, A. S. CO₂flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 1898-1908, 2021.
- HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES)**. Guidance on the Application of the Revised Structure. Nottingham, UK: Fabis Consulting Ltd./European Environment Agency, v. 5, n. 1, p. 1- 10, 2018.
- HUETE, A. R. Vegetation Indices, Remote Sensing and Forest Monitoring. **Geography Compass**, v. 6, n. 9, p. 513-532, 2013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/frei-martinho/panorama>. Acesso em: 19 jul. 2021.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. 2018. **Normais Climatológicas do Brasil**: período: 1981-2010. Brasília. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 15 de dez. 2023.
- IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.). Genebra, Suíça: **Working Group / Technical Support Unit**, 2018.
- JESUS, J. B.; SANTANA, I. D. M. Estimation of land surface temperature in caatinga area using Landsat 8 data. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, p. 150-157, 2017.
- LEAL, I. R.; SILVA, J. M.; TABARELLI, M.; LACHER JR.; T. E. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, p. 139-146, 2005.

- MAIA, J. M.; SOUSA, V. F. O.; LIRA, E. H. A.; LUCENA, A. M. A. Motivações socioeconômicas para a conservação e exploração sustentável do bioma Caatinga. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 41, p. 295-310, 2017.
- MORAIS, Y. C. B.; ARAÚJO, M. S. B.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R. Q. Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585-599, 2017.
- OLIVEIRA, C. L.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; ANTONINO, A. C. D.; ALVES, M. F. A. T.; SILVA, V. P.; LOPES, M. H. L.; SOUZA, E. S.; FERREIRA, R. C. A caatinga emite ou sequestra carbono? **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 12, p.791-804, 2023a.
- OLIVEIRA, P. J. L.; GUEDES, J. F.; COSTA, D. F. S. Serviços ecossistêmicos de regulação em uma bacia hidrográfica no semiárido do Brasil. **Revista Mercator**, v. 21, p. 1-18, 2022.
- OLIVEIRA, P. J. L.; GUEDES, J. C. F.; SANTOS, J. Y. G.; COSTA, D. F. S. Aplicação da USLE nos Serviços Ecossistêmicos de Controle de Erosão em Área Suscetível à Desertificação, NE-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 02, p. 1088-1103, 2023b.
- PAVÃO, V. M.; QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; PAVÃO, L. L.; QUERINO, J. K. A. S.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Temperatura e albedo da superfície por imagens TM Landsat 5 em diferentes usos do solo no Sudoeste da Amazônia brasileira (Nota de pesquisa). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 11, p. 169-183, 2015.
- PEREIRA, J. A. V.; SOUZA, Y. G.; CORRERIA, I. M. G.; SOUZA, B. I. Uso e cobertura do solo e comparação entre os índices de vegetação SAVI e NDWI na área de proteção ambiental das onças, Paraíba, Brasil. **Revista de Geografia**, v. 37, n. 2, p. 278-298, 2020.
- PEREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. M. B.; MEDEIROS, S. S. de.; TINÔCO, L. B. de. M.; SALCED, I. H. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica? **Revista parcerias estratégicas**, v. 17, n. 34, p. 87-106, 2012.
- 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: Editora Universitária da UFPE, p. 10-58, 2003.
- QUEIROZ, M. A. Recursos Genéticos Vegetais da Caatinga para o Desenvolvimento do Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 1135-1150, 2011. Disponível em: <http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/273/223>.
- RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. **Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery**. Pasadena, Califórnia: AVIRIS Workshop, JPL/NASA, p. 1-8, 2000.
- ROSA, H. A.; FARIA FILHO, R. Influência da vegetação na temperatura da superfície em áreas urbanas por meio de imagens do satélite Landsat 8. **E&S Engineering And Science**, v. 12, n. 2, p. 1-18, 4 ago. 2023.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, 1973, 63 p.
- SANTOS, C. V. B.; BAPTISTA, G. M. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, A. B. S.; FRANCA-ROCHA, W. J. S., CARVALHO, H. F. S.; GALVÍNCIO, J. D. Validação de um modelo

espectral para determinação de fluxos de CO₂ em áreas do Bioma Caatinga. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, n. 3, p. 226-239, 2023.

SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. M. Análises espectrais da vegetação com dados Hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO₂ em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 21, n. 2, p.354-370, 2015.

SOUZA, B. I. Desertificação e dinâmica da cobertura vegetal: conhecimentos acumulados e desafios vigentes. **Revista Geo UERJ**, n. 42, p. 1-23, 2023.

TABARELLI, M; LEAL, I. R.; SCARANONI, F. R.; SILVA, J. M. C. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Cienc. Cult.** v. 70, n. 7, p. 25-29, 2018.

USGS – United States Geological Survey. **Example of the Landsat Surface Temperature Science Product**. 11 dez. 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>. Acesso em: 11 dez. 2023.

USGS – United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat Level-1 Data Product**. 2023. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>. Acesso em: 14 dez. 2023.