



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 12, nº 1 (2026)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2026v12n1ID41736>



Serviços Ecosistêmicos, Sequestro de Carbono de uma Área Susceptível à Desertificação: Um estudo no Centro-Norte do Ceará, Brasil.

Ecosystem Services, Carbon Sequestration in an Area Susceptible to Desertification: A Study in the North-Central Region of Ceará, Brazil.

Igor Bulhões Barros¹; Níveo Moreira da Rocha²; Maria Lucia Brito da Cruz³

- ¹ Universidade Estadual do Ceará, PPG em Geografia (PropGeo), Fortaleza/CE, Brasil. Email: professorigorbulhoes@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8881-0533>
- ² Universidade Estadual do Ceará, PPG em Geografia (PropGeo), Fortaleza/CE, Brasil. Email: niveo.rocha@aluno.uece.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8417-8109>
- ³ Universidade Estadual do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza/CE, Brasil. Email : lucia.cruz@uece.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2202-923X>

Resumo: Este estudo analisou o potencial de sequestro de carbono em diferentes classes de cobertura do solo em uma Área Suscetível à Desertificação (ASD 1) no Centro-Norte cearense, utilizando sensoriamento remoto e índices espectrais. Foram utilizadas imagens do Landsat 8 para calcular o NDVI, PRI, sPRI e CO₂ Flux, visando estimar a eficiência do sequestro de carbono. A classificação do uso e cobertura do solo foi realizada com o algoritmo Random Forest, resultando em seis classes: Corpo Hídrico, Zona Urbana, Solo Exposto, Agricultura/Vegetação Herbácea, Caatinga Arbustiva e Caatinga Arbórea. Os resultados indicaram que a Caatinga Arbórea (53% da área) e a Caatinga Arbustiva (33%) apresentaram os maiores valores de CO₂ Flux, especialmente durante o período chuvoso. Em contraste, o Solo Exposto (10% da área) e a Agricultura/Vegetação Herbácea (1%) exibiram capacidades significativamente reduzidas. Testes estatísticos não paramétricos (Kruskal-Wallis e Dunn) confirmaram diferenças significativas entre as medianas das classes. Concluiu-se que a sazonalidade climática e o tipo de cobertura vegetal são determinantes para a dinâmica do sequestro de carbono, reforçando a necessidade de políticas de conservação e manejo sustentável para mitigar a degradação e ampliar os serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: Sequestro de carbono; Caatinga; Sensoriamento remoto; Desertificação; Serviços ecossistêmicos.

Abstract: This study analyzed the carbon sequestration potential in different land cover classes in a Desertification-Susceptible Area (ASD 1) in the North-Central region of Ceará, using remote sensing and spectral indices. Landsat 8 images were used to calculate NDVI, PRI, sPRI, and CO₂ Flux, aiming to estimate carbon sequestration efficiency. Land use and land cover classification was performed using the Random Forest algorithm, resulting in six classes: Water Body, Urban Area, Exposed Soil, Agriculture/Herbaceous Vegetation, Shrub Caatinga, and Arboreal Caatinga. The results indicated that Arboreal Caatinga (53% of the area) and Shrub Caatinga (33%) showed the highest CO₂ Flux values, especially during the rainy season. In contrast, Exposed Soil (10% of the area) and Agriculture/Herbaceous Vegetation (1%) exhibited significantly reduced capacities. Non-parametric statistical tests (Kruskal-Wallis and Dunn) confirmed significant differences between class medians. It was concluded that climatic seasonality and vegetation cover type are determinants for carbon sequestration dynamics, reinforcing the need for conservation policies and sustainable management to mitigate degradation and enhance ecosystem services.

Keywords: Carbon sequestration; Caatinga; Remote sensing; Desertification; Ecosystem services.

1. Introdução

A contínua expansão de variadas formas de uso e ocupação da terra, muitas vezes desordenada e inconsequente, vem causando uma crescente degradação dos recursos naturais da caatinga (SOUZA, 2000; OLIVEIRA, 2022). A degradação pode ser entendida como a perda de produtividade, assumindo alterações de conotação negativa, pois está relacionada à perda da qualidade ambiental, podendo ser percebida em diferentes graus, sendo o homem o principal causador dessa deterioração (SÁNCHEZ, 2020).

Das atividades praticadas que mais degradam a Caatinga, destacam-se: o corte, o extrativismo vegetal, a pecuária extensiva e a agricultura em moldes rudimentares (SANTOS, 2021). Tais práticas são agravadores das mudanças climáticas. Nos últimos anos, vários estudos e iniciativas políticas começaram a ser realizados buscando conhecer essas práticas, os seus impactos, bem como aplicar possíveis ações de combate e mitigação dessas ações com vistas o cenário das mudanças climáticas (SILVA, 2018; NIEMEYER; VALE, 2022).

Os processos ecológicos são responsáveis pelo funcionamento e produção de serviços que regulam e mantêm a qualidade de vida, denominados *Serviços Ecosistêmicos* (SE) (DAILY, 1997; MEA, 2005; COSTANZA et al., 2014; SANTOS, 2022). O uso intensivo e inconsequente do ambiente sem levar em consideração o limite natural dos mesmos, tem feito com que esses serviços sejam afetados. Atualmente um dos mais alarmantes problemas é a emissão de gases que intensificam as mudanças climáticas. No Brasil, esses gases são gerados sobretudo em virtude do desmatamento e más práticas de agropecuária. Dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (2023), revelam que no Brasil a mudança no uso da terra é a principal fonte de emissão de carbono.

Mudanças nas características ambientais podem desencadear em um desequilíbrio no fluxo de matéria e energia. Sobretudo ao interferir na deposição da matéria orgânica do solo (PRIMIER; MUNIZ; LISBOA, 2014; ASSUNÇÃO et al., 2019) e nos processos de produção primária bruta e respiração vegetal (OLIVEIRA et al., 2021). De acordo com a Common International Classification of Ecosystem Services (CICES), o sequestro de carbono está inserido entre os principais serviços ecossistêmicos, estando inserido nos serviços de regulação (HAINES-YOUNG; POTSCHIN 2018; DANTAS, 2024).

Enquanto instrumento de gestão ambiental, o sequestro de carbono se insere nas políticas de mercado nacional e internacional para a manutenção da diminuição de Carbono na atmosfera (SILVA, 2018). Iniciativas que visem a diminuição e o estoque deste gás fazem parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), proposto na Convenção do Clima (FUJIHARA, 2023), estando também no ODS 13 da ONU (2015). Nesse sentido, o entendimento da distribuição espacial das áreas de maior relevância de prestação de serviços ecossistêmicos sobretudo da capacidade de sequestro de carbono fornecem importantes estruturas para novas abordagens metodológicas de gestão territorial (BURKHARD et al., 2009, OLIVIERA, 2022).

As florestas encontram-se no centro das discussões, devido às suas capacidades de sequestrar e armazenar carbono, apesar disso a caatinga ainda é uma vegetação que carece de estudos no que concerne o potencial de sequestro de carbono, sobretudo ao considerar o ciclo fenológico bem como a apropriação que passa esse quadro natural. No caso do Ceará, forças produtivas atuam sobre esse domínio desde do século XVII (SOUZA, 2000; 2006a), desde esse momento mudanças na cobertura vegetal, bem como nos demais componentes da paisagem alteram as condições ambientais naturais.

Nos últimos anos, o sensoriamento remoto tem sido uma ferramenta bastante utilizada na estimativa de biomassa florestal e no sequestro de carbono (SILVA, 2018; SILVA, 2021). Mesmo com as florestas tropicais brasileiras possuindo um papel conhecido no sequestro de CO₂, estudos sobre SE, sobretudo o sequestro de carbono nas ASDs (Áreas Suscetíveis à Desertificação), ainda parecem ser insuficientes diante do cenário de mudanças climáticas vigentes. Nesse sentido está pesquisa tem como objetivo analisar o potencial de sequestro de carbono e da prestação de SE da vegetação em diferentes períodos na ASD 1 no Centro-Norte cearense, atrelado aos impactos e as modificações causadas pelo uso e ocupação do solo.

2. Metodologia

2.1 Caracterização da Área de Estudo

A área em estudo está inserida em um dos três principais núcleos de desertificação do estado do Ceará. Com base em mapeamentos estaduais, identificou-se que os piores estados de conservação da vegetação coincidem com regiões de baixa pluviosidade, solos degradados, longo histórico de uso, altos índices de pobreza e elevadas taxas de analfabetismo (BRASIL, 2004; CEARÁ, 2010). Essas regiões, consideradas as mais críticas, foram classificadas como Áreas Suscetíveis

à Desertificação (ASDs). Este trabalho foca especificamente na ASD 1, denominada Sertões do Centro-Norte, a qual abrange os municípios de Irauçuba, Canindé, Sobral, Miraíma, Itapajé e Santa Quitéria (Figura 1) (IPECE, 2010; FUNCEME, 2015).

O clima da região da ASD é classificado como semiárido, com precipitação anual abaixo de 800 mm, temperatura média superior a 26°C e índices extremamente elevados de evaporação e evapotranspiração (FERREIRA, 2021). Quanto aos recursos hídricos, os corpos d'água são predominantemente intermitentes, com regime de escoamento sazonal e altas concentrações de sais.

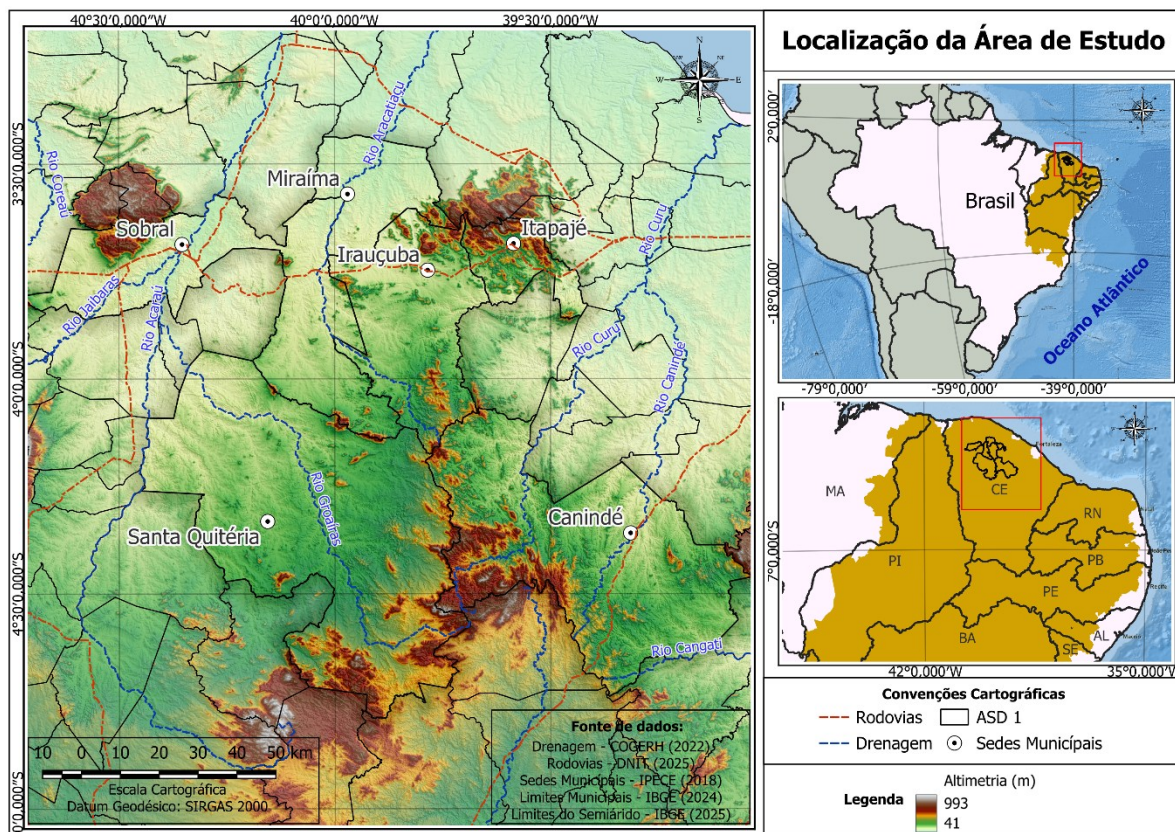


Figura 1 – Localização da Área de Estudo.
 Fonte: Autores (2025).

A geologia da ASD 1 é majoritariamente composta pelo Domínio Ceará Central, inserido na Província Borborema (CORRÊA et al., 2010), e abrange as Unidades Canindé e Independência (FUNCEME, 2015; CPRM, 2021). A geomorfologia da área é marcada por estruturas deformacionais dúcteis e rúpteis impressas no embasamento cristalino pré-cambriano (MAIA; BEZERRA, 2014). As feições de relevo que mais caracterizam a área de estudo são a depressão sertaneja FUNCEME (2015), morros e cristas residuais (SOUZA, 2000; CLAUDINO-SALES, 2016).

A cobertura vegetal da ASD é predominantemente caracterizada por Caatinga do Cristalino e Mata Seca do Cristalino (MORO et al., 2015). Essa vegetação é composta por espécies de porte arbustivo, com presença de indivíduos arbóreos. Além disso, em pequenas áreas de maior altitude, destacam-se fragmentos de florestas tropicais úmidas ou semidecíduas (FERNADES 2006; REIS et al., 2024).

2.2 Processamento das Cenas Espectrais, Geração do Índice do potencial de fluxo de Carbono e Testes Estatísticos

Para a análise do potencial de sequestro de carbono presente na área de estudo foram adquiridas imagens do satélite Landsat 8, em vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Foram escolhidas as bandas 5 (infravermelho),

4 (vermelho), 3 (verde) e 2 (azul) para gerar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) e o Índice do Potencial de Fluxo de Carbono (CO₂ Flux), conforme contribuições dos trabalhos de Silva et al., (2021) e Oliveira; Guedes; Costa (2023). Todos os procedimentos foram realizados no *Google Earth Engine (GEE)*.

Em primeiro momento foi realizado o cálculo do NDVI para estimar a biomassa fotossinteticamente ativa e, posteriormente, relacioná-la ao estoque de carbono. As bandas espectrais utilizadas foram a banda 4 que expressa a absorção da clorofila pelo vermelho (V) e a banda 5 que possui alta reflectância interna das folhas no infravermelho próximo (IP). Esse índice é calculado pela relação entre o vermelho e o infravermelho próximo (HUETE; JACKSON, 1987). O NDVI é expresso na seguinte Equação:

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

Também foi realizado o cálculo do PRI, esse cálculo tem como objetivo verificar as alterações nos pigmentos de carotenóides (principalmente a xantofila) da folhagem Silva (2025). Os mesmos são indicativos de que houve eficiência do uso da luz fotossintética ou na taxa de dióxido de carbono armazenada pela folhagem (CANAVESI; PONZONI; VALERIANO, 2010). PRI é expresso na seguinte Equação:

$$PRI = \frac{blue - green}{blue + green}$$

Posteriormente a geração do índice PRI, faz-se necessário o reescalonamento de seus valores para positivos, gerando o índice sPRI (SILVA et al., 2017). Este reescalonamento é necessário para normalizar os dados de “verdor” da vegetação. Esse índice tem seus valores variando entre 0 e 1 (SILVA; BAPTISTA, 2015). O sPRI é expresso na seguinte Equação:

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2}$$

Por fim foi utilizada a equação proposta por Rahman et al. (2000), para obtenção do índice CO₂ Flux a partir do NDVI e sPRI. Determinando assim o potencial de sequestro de dióxido de carbono pela vegetação fotossinteticamente ativa. Nesse sentido quanto maior for seu o valor, maior será a eficiência do processo de sequestro de carbono pela vegetação na fase clara da fotossíntese (OLIVEIRA; GUEDES; COSTA, 2023). O CO₂ Flux é expresso na seguinte Equação:

$$C\ Flux = NDVI * sPRI$$

No tocante ao mapeamento dos SE de sequestro de carbono, foi utilizada a proposta Costanza et al. (2014). Para a quantificação dos mesmos, foi utilizado a escala de classificação de acordo com Burkhard et al. (2014). A partir dos classes identificadas em campo, foi utilizado uma imagem de referência gerada através de uma média do ano de 2024, buscando entender o ciclo natural da vegetação da caatinga (FERNANDES, 2006) e agricultura, tendo em vista que as mesmas são fortemente influenciadas pela pluviometria. Inicialmente foi utilizado a composição RGB do satélite Landsat 8, o produto gerado foi calculado usando também dados de declividade e altimetria. Todo o procedimento se deu pelo *GEE*, a coleta de classes foi realizada no software QGIS 3.44.

Com o fim dessa etapa foi feita a classificação com base nos dados encontrados em campo, sendo os mesmos agrupados em seis classes (Corpo Hídrico; Zona Urbana; Solo Exposto; Agricultura e Vegetação Herbácea; Caatinga Arbustiva e Caatinga Arbustiva-arbórea), foram coletadas um total de 200 amostras de cada classe. A identificação das classes em campo ocorreram entre os anos de 2024 e 2025. A classificação foi realizada pelo *Random Forest* (BREIMAN, 2001;

BIAU; SCORNET, 2016), estabeleceu-se uma função para determinar qual número de árvores oferecia o melhor modelo, para esta pesquisa o total de 90 árvores demonstrou maior acurácia, acurácia geral e o maior valor do índice *Kappa*.

Foi utilizado todas as imagens referentes ao ano de 2024 (23), sem tomar como critério a incidência de nuvens com intuito de obter o maior número possível de pixels limpos. Sendo necessário a aplicação de uma máscara de sombra de nuvem, nuvem e nuvem tipo cirrus, para eliminar todo e qualquer pixel que tivesse a influência desses alvos. Logo após foi calculado com todas as imagens o CO₂ Flux (RAHMAN et al, 2000), sendo extraído os valores dos pixels de acordo com as classes de imagens de uso e cobertura que foram utilizadas no mapeamento de Land Use/Land Cover (LULC). Com o intuito de entender o comportamento da vegetação, bem como as demais características ambientais e a degradação da área, não foram utilizadas as classes de zona urbana e corpo hídrico, e a sua relação com carbono (SILVA et al., 2017). Os dados foram tabulados e executados os testes estatísticos com a confecção do Boxplot.

Posteriormente foi executado o teste de *Kruskal-Wallis*, sendo o mesmo um método não paramétrico que é utilizado para comparar três ou mais grupos independentes. Ele é usado para testar a hipótese nula (H₀), as medianas dos grupos são iguais distribuições em relação a hipótese alternativa (H₁). Buscando entender se existem diferenças entre ao menos dois grupos de dados. Se o valor de $P \leq 0,05$ a hipótese nula é rejeitada. Indicando que existe diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois grupos. De forma complementar ao teste de *Kruskal-Wallis*, foi utilizado o teste de *Post Hoc* de *Dunn*, também não paramétrico utilizado para múltiplos grupos.

3. Resultados e discussão

Na ASD, as áreas de maior altitude, abrigam formações mais densas como a caatinga arbustivo arbórea, arbórea e por vezes trechos de vegetações ombrófilas, essas áreas mantêm-se relativamente mais preservadas devido à topografia acidentada, que impõe barreiras naturais à expansão agropecuária. No entanto, registra-se que mesmo esses remanescentes vêm sofrendo transformações progressivas.

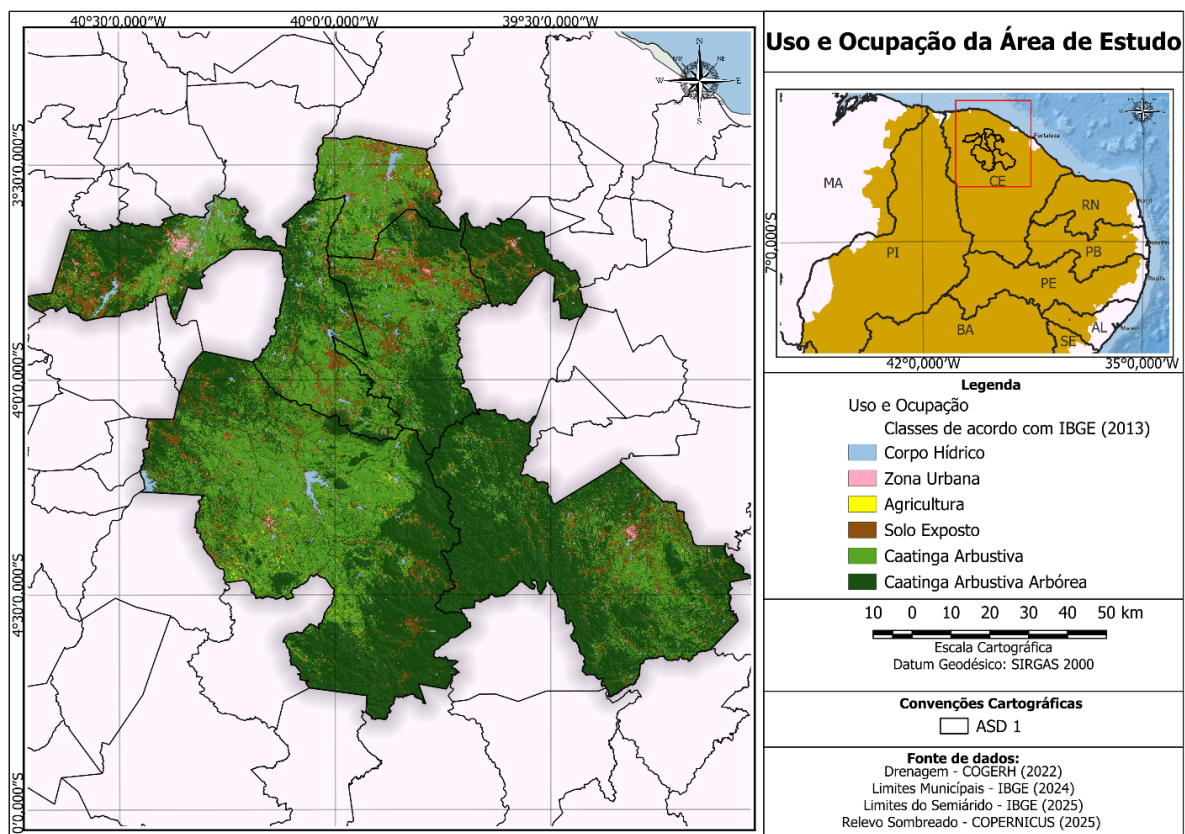


Figura 2 – Uso e ocupação da Área de Estudo.
Fonte: Autores (2025).

Trabalhos como o de Sampaio et al. (2021) e Mendes et al. (2025), evidenciam como o uso do solo pode influenciar no sequestro de carbono e na prestação de serviços ecossistêmicos, outrossim o desmatamento de áreas com vistas à conversão para a agricultura (MAIA et al., 2010), a remoção seletiva de madeira e o sobrepastejo afetam diretamente o fluxo de CO₂ na caatinga (FALCÃO et al., 2021). A área de estudo apresenta o reflexo de um uso intensivo da terra que se manifesta com mais intensidade desde o século XVII.

O padrão de uso e ocupação do solo na ASD evidencia a dinâmica histórica de apropriação predatória a que a área foi submetida. Como consequência, a paisagem é majoritariamente composta por grandes extensões de caatinga arbustiva, uma clara manifestação de vegetação secundária, como parece ser o padrão encontrado por toda a vegetação do semiárido (SOUZA; ARTIGAS; LIMA, 2015; OLIVEIRA; SAMPAIO, 2020; SILVA; SANTOS; SILVA, 2020; DANTAS, 2024).

Tabela 1 – Valores de cobertura do solo na ASD 1.

Classe de cobertura do solo	Área em Km²	Porcentagem
Corpo Hídrico	232.113	2%
Zona Urbana	56.297	0,48%
Agricultura/Vegetação Herbácea	65.697	1%
Solo Exposto	1193752	10%
Caatinga Arbustiva	3.990.998	33%
Caatinga Arbórea	6.449.706	53%
Total:	232.113	100%

Fonte: Autores (2025).

Em se tratando de uma área suscetível à desertificação, o solo exposto se manifesta em parte considerável da área de estudo, em comparação com as demais classes utilizadas neste estudo, a mesma demonstrou ser a que menos tem papel efetivo no sequestro de carbono. Tendo em vista sobretudo a estreita relação entre degradação e modo de consumo, esse dado deve ser considerado no que se refere as emissões de gases de efeito estufa, haja vista a mudança na cobertura, esses valores são evidenciados na (Tabela 1), onde a classe de solo exposto apresenta 10% da área total.

De modo concordante com a pluviometria ao longo dos trimestres das classes encontradas pelo índice CO₂ Flux, percebe-se que a vegetação da ASD sofreu grande influência da precipitação ao longo do ano e pelas características ocupacionais da área. O que afetou diretamente a fenologia e o potencial de trocas atmosféricas ao longo do período analisado pela vegetação de caatinga. Entender essa influência é essencial para compreender o sequestro de carbono na caatinga (NISHIWAKI, 2023).

Nesse sentido, os valores mais elevados de sequestro de carbono da área de estudo foram registrados no segundo trimestre, com valores que variaram entre a capacidade relevante muito alta à média capacidade relevante. O primeiro trimestre apresentou potencial menor em comparação ao segundo, variando entre os seguintes valores: média capacidade relevante e capacidade relevante. Apesar disso, esse período é o momento de maior assimilação de carbono pela caatinga em decorrência do início da quadra chuvosa, onde registra-se a maior produção primária bruta.

O terceiro trimestre caracterizado por um processo de transição entre os períodos chuvoso e seco, apresentou valores que variaram nos intervalos de média a baixa capacidade relevante, apresentando assim um significativo decaimento em relação ao período com chuvas frequentes e maior atividade fotossintética. No tocante à variação mensal do sequestro de carbono, percebe-se que a variabilidade sazonal da precipitação exerce forte influência no quantitativo de carbono sequestrado pela vegetação (BRITO MORAIS et al., 2017).

No quarto trimestre, que apresenta a maior pungência a estação seca, o potencial de sequestro de carbono apresentou redução significativa de valores, inclusive quando comparado ao segundo trimestre, apresentando valores que variaram entre média capacidade relevante nas áreas mais altas a baixa e nenhuma capacidade relevante na maior parte da área de estudo. Apesar disso, nota-se que as áreas mais elevadas tendem a apresentar valores que se mantêm com pouca alteração em comparação às áreas mais aplainadas.

Nota-se que, mesmo no período chuvoso, as áreas de caatinga antropizada da ASD assimilaram menos carbono em comparação com as demais áreas. Destaca-se também que as áreas que apresentam nenhuma capacidade relevante de fluxos de Carbono são justamente as áreas de corpos hídricos, por se tratarem de feições na paisagem nas quais não há cobertura vegetal, quando não considera a vegetação ripária (SILVA et al., 2017). Ao longo do ano, o comportamento

fenológico da vegetação aliado ao uso e ocupação do solo, reflete a relação dos serviços ecossistêmicos e o uso e cobertura do solo.

As alterações que acontecem na cobertura vegetal da área de estudo entre os períodos secos e chuvosos modificam o balanço de radiação que é o principal fator de interação da superfície com a atmosfera, podendo iniciar ou cessar o estágio de caducifolia das espécies vegetais. Além disso, deve-se destacar as extensas porções de terra degradadas e o uso da biomassa produzida para sustento da criação de caprinos, ovinos e bovinos característicos dessa região. O trabalho de Da Costa et al. (2025), evidencia o papel da caatinga enquanto sumidouro de carbono, sobretudo devido à rápida resposta da vegetação às condições pluviométricas. Apesar disso, destaca-se que aproximadamente 10% ASD apresenta solo exposto, reflexo de más práticas de uso e conservação da paisagem.

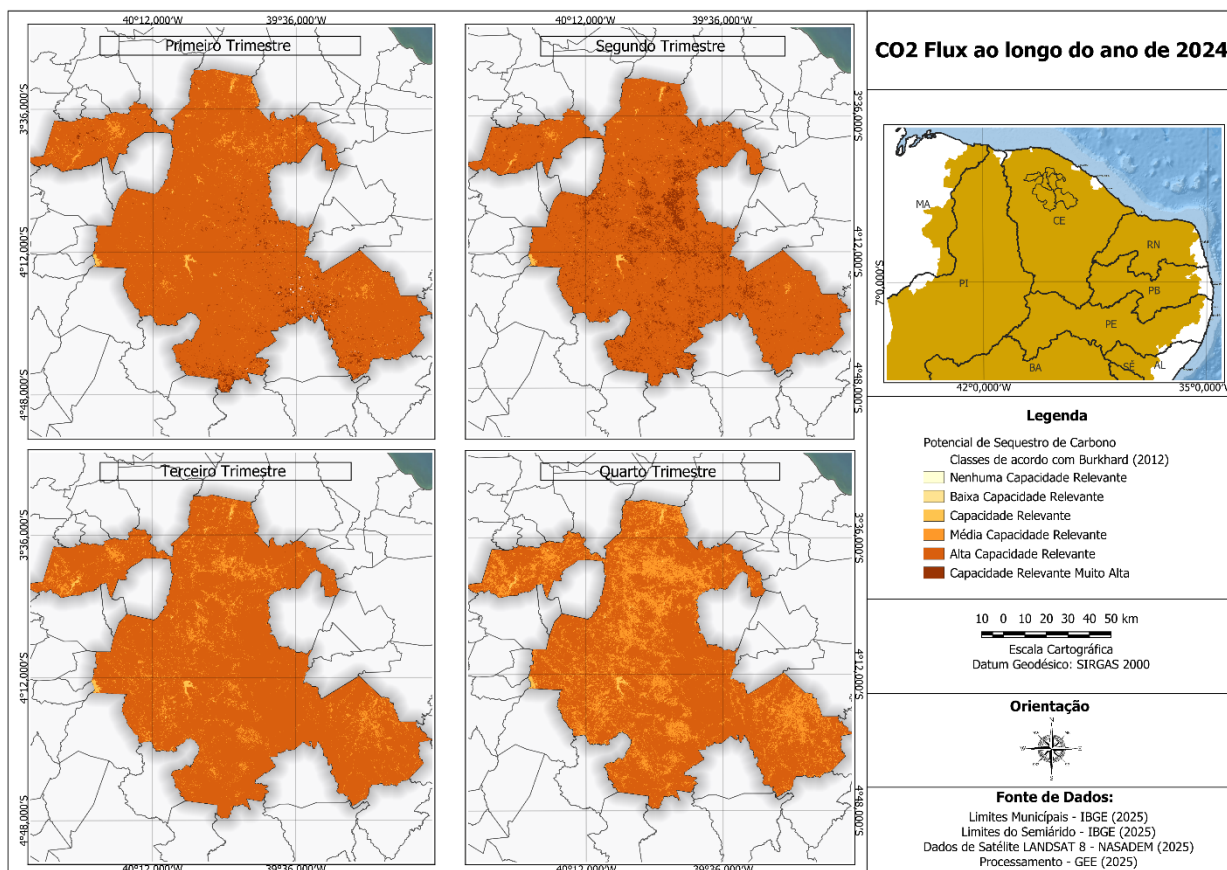


Figura 3 – Sequestro de Carbono ao longo do ano de 2024 da Área de Estudo.

Fonte: Autores (2025).

De modo geral, a degradação ambiental independe do modo de produção, mas a sua intensidade ocorre de acordo com o modo de apropriação material. Em estudo realizado na ASD 1 por Lima et al. (2024), os autores constataram que a degradação do solo reduz em mais de 50% de sua funcionalidade, reduzindo a capacidade de sustentar o crescimento das plantas bem como a diminuição do sequestro de carbono e o provimento de demais serviços ecossistêmicos. Nesse sentido, a contínua expansão de áreas com solo exposto interfere diretamente na menor capacidade de sequestro de carbono, como pode ser evidenciado na (Figura 4).

O solo exposto, que corresponde a 10% da área total, foi a classe menos eficiente no sequestro de carbono. Já a classe representada pela agricultura e vegetação herbácea, que corresponde a 1% da ASD, teve uma interação maior em relação ao fluxo de carbono, porém menor que as demais classes. O ciclo vegetativo das herbáceas na caatinga é condicionado sobretudo pelas características sazonais (ANDRADE-LIMA, 1981), a mesma denota um estágio inicial de sucessão

ecológica secundária. Assim como a vegetação herbácea, a agricultura no semiárido cearense é diretamente condicionada pelo regime hídrico.

Quando analisado ao longo do ano, a vegetação herbácea e a agricultura têm um papel significativamente menor em relação à vegetação arbustiva e arbórea, devido o seu ciclo mais curto em relação aos demais estratos vegetacionais. Tais classes na caatinga, têm seu pico vegetativo em consonância com o ápice do período chuvoso e um decaimento subsequente. Apesar disso, grandes porções de vegetação são desmatadas para a conversão em áreas de plantio e posterior ao período de colheita, abandonadas. A partir de então, sem o devido manejo, inicia-se o processo erosivo, formando crostas na superfície, dificultando a infiltração de água e o estabelecimento da vegetação.

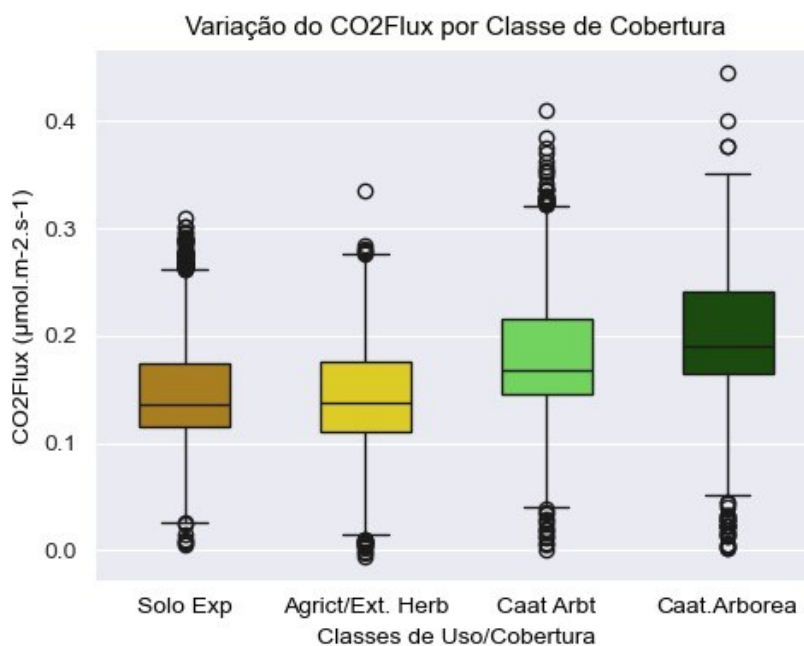


Figura 4 – Boxspot da interação do índice CO₂ Flux com as classes de cobertura.

Fonte: Autores (2025).

As classes de caatinga arbustiva e arbórea, aproximadamente 33% e 53% da área total da ASD, mostraram os maiores valores de CO₂ Flux indicando maior eficiência no sequestro de carbono. Essas classes vegetacionais têm biomassa mais estável e ciclo fotossintético mais prolongado, especialmente durante a estação chuvosa. Mesmo evidenciado a vegetação de maior prestação de serviços ecossistêmicos as classes de caatinga arbustiva e arbórea, principalmente a vegetação arbórea, são as mais afetadas pelo uso intensivo da terra, sobretudo para o abastecimento do primeiro setor econômico e para cocção de alimentos. Assim, evidencia-se que a manutenção da vegetação é essencial para a manutenção dos serviços ecossistêmicos de regulação do carbono.

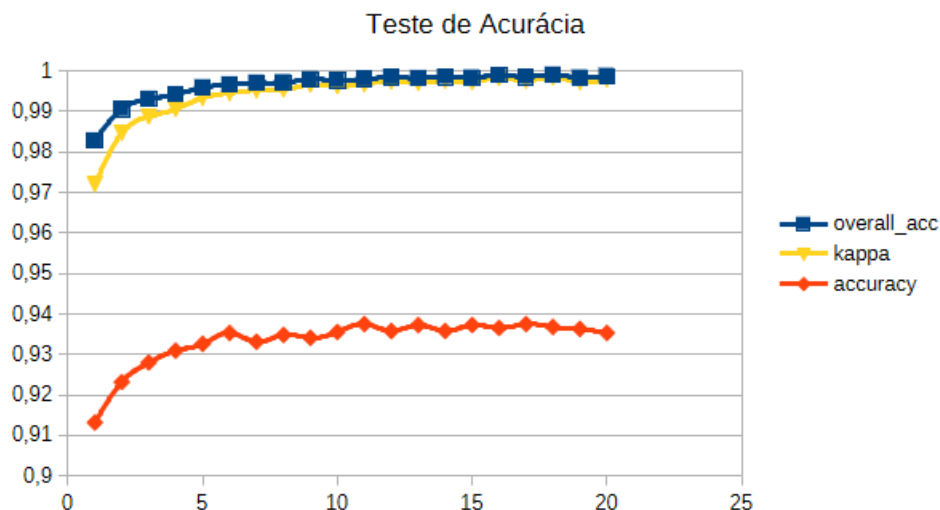


Figura 5 – Teste de acurácia dos dados.

Fonte: Autores (2025).

Os testes estatísticos entre as classes revelou que a acurácia geral atingiu valores próximos à 0,99, já o índice Kappa também alcançou elevados, próximos de 0,98, o que indica que a classificação das classes mapeadas foi extremamente precisa. A alta acurácia revela que o modelo *Random Forest* utilizado com 90 árvores foi capaz de classificar corretamente 99% dos pixels nas categorias de uso do solo, havendo assim, uma correspondência muito forte entre as amostras coletadas em campo (200 por classe) e a classificação automática realizada. A alta confiabilidade do mapeamento de uso e cobertura do solo respaldou as análises de sequestro de carbono por classe. Esses resultados justificaram a utilização das mesmas para os testes estatísticos realizados *Kruskal-Wallis* (Tabela 2) e *Dunn* (Tabela 3).

O teste de *Shapiro-Wilk* indicou que as amostras não apresentavam distribuição normal. Assim, a aplicação pelo teste de *Kruskal-Wallis*, foi utilizada como alternativa não paramétrica, para comparar as medianas entre os grupos. O teste *Post hoc* de *Dunn* identificou que existe entre os grupos diferenças significativas. Outrossim, o teste *Kruskal Wallis* determinou o valor de $p = 0.0$ demonstrando haver diferenças significativas entre medianas das classes, assim, a hipótese nula (H_0), foi rejeitada.

Tabela 2 – Teste de *Kruskal Wallis*

Teste <i>Kruskal Wallis</i>	
Estatística do teste	4229.584310016773
p-valor	0.0
Rejeita H_0	Os grupos apresentam distribuições significativamente distintas (p-valor = 0.0)

Fonte: Autores (2025).

Tabela 3 – Teste *Posthoc*

Posthoc <i>Dunn</i>				
Caat Arborea	1.000000e+00	2.510464e-79	0.000000e+00	0.000000e+00
Caat Arbustiva	2.510464e-79	1.000000e+00	1.267798e-282	2.502668e-237
Extr Herb/ Agrlt	0.000000e+00	1.267798e-282	1.000000e+00	1.497513e-02
Solo Exposto	0.000000e+00	2.502668e-237	1.497513e-02	1.000000e+00

Fonte: Autores (2025).

Diante do cenário revelado pela (Tabela 3), percebe-se que as classes mais similares são as de Extrato Herbáceo/Agrícola e Solo Exposto, desempenhando um menor sequestro de carbono em relação às demais. Já as classes

referentes à Caatinga Arbórea e Caatinga Arbustiva, apresentam valores que representam condições ambientais mais distintas entre si e em relação aos outros usos do solo.

4. Considerações finais

Este estudo analisou o potencial de sequestro de carbono em diferentes classes de cobertura do solo em uma Área Suscetível à Desertificação (ASD 1) no Centro-Norte cearense, utilizando uma abordagem integrada de sensoriamento remoto e índices espectrais. Os resultados demonstraram uma relação direta entre o tipo de cobertura vegetal e a capacidade de sequestro de carbono, com a Caatinga Arbórea (53% da área) e Arbustiva (33%) apresentando os maiores valores de CO₂ Flux, especialmente durante o segundo trimestre, correspondente ao pico do período chuvoso. Em contrapartida, áreas de Solo Exposto (10% da área) e Agricultura/Vegetação Herbácea (1%) exibiram capacidades significativamente reduzidas, refletindo o histórico de degradação e o uso intensivo do solo na região.

A sazonalidade climática mostrou-se um fator determinante na dinâmica do sequestro de carbono, com reduções expressivas durante a estação seca. Contudo, mesmo no período mais favorável, às áreas antropizadas apresentaram menor eficiência na assimilação de CO₂, evidenciando que a estrutura da vegetação e o estado de conservação são tão importantes quanto a disponibilidade hídrica. Além disso, as áreas de maior altitude mantiveram relativa estabilidade no sequestro de carbono, sugerindo a importância de ações de conservação focadas nesses remanescentes.

Os resultados reforçam a urgência de políticas públicas e práticas de manejo que considerem a heterogeneidade da paisagem e a sazonalidade ecossistêmica. Estratégias de restauração ecológica prioritária em áreas degradadas, associadas ao incentivo ao manejo sustentável em áreas de caatinga preservada, podem potencializar os serviços ecossistêmicos de regulação do carbono, contribuindo simultaneamente para a mitigação das mudanças climáticas e o combate à desertificação.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- Andrade-Lima, D. de. 1981. The caatinga dominium. *Revista Brasileira Botânica*. 4: 149-53.
- Assunção, S. A. et al. Soil organic carbon depletion from forests to grasslands conversion in Brazil: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 283, 106585, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.021>.
- Biau, Gérard; Scornet, Erwan. Um passeio guiado aleatório pela floresta. *Teste*, v. 25, n. 2, p. 197-227, 2016.
- BRASIL. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**, PAN-BRASIL. Brasília, DF: MMA, 2004. 225 p.
- Breiman, L. **Random Forests**. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Brito Moraes, Ygor Cristiano et al. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 4, p. 585-599, 2017.
- Burkhard, B.; Kroll, F.; Müller, F.; Windhorst, W. Landscape's capacities to provide ecosystem services –a concept for land-cover based assessments. *Landscape Online*, v. 15, p. 1-22, 2009.
- Burkhard, B.; Kandziora, M.; Hou, Y.; Müller, F. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landscape online*, v. 34, p. 1-32, 2014.
- Canavesi, V.; Ponzoni, F. J.; Valeriano, M. M. Estimativa de volume de madeira em plantios de Eucalyptus spp. utilizando dados hiperspectrais e dados topográficos. *Revista Árvore*, v. 34, n. 3, p. 539-549, 2010.

- Claudino-Sales, Vanda. **Megageomorfologia do Estado do Ceará: história da paisagem geomorfológica**. Novas Edições Acadêmicas, 2016.
- CEARÁ. **Programa de ação estadual de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca**. Fortaleza: MMA e SRH, 2010.
- Corrêa, Antonio Carlos de Barros et al. Megamorfolgia e morfoestrutura do Planalto de Borborema. **Revista do Instituto Geológico** (Descontinuada), v. 31, n. 1-2, p. 35-52, 2010.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van Der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I.; Faber, S.; TURNER, R. K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, p. 152-158, 2014.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto mapa geológico e de recursos minerais do estado do Ceará / Organizadores Tercyo Rinaldo Gonçalves Pinó [e] Edney Smith de Moraes Palheta. – Escala: 1:500.000 – Fortaleza : CPRM, 2021.**
- Da COSTA, Luis Miguel; DAVITT, Aaron; VOLPATO, Gabriela; de MENDONÇA, Gislaíne Costa; PANOSSO, Alan Rodrigo; LA SCALA, Newton. **A comparative analysis of GHG inventories and ecosystems carbon absorption in Brazil. Science of The Total Environment**, v. 958, p. 177932, 2025. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177932>.
- DANTAS, C. d S. **Serviços ecossistêmicos de provisão prestados pela caatinga: uma análise do uso e cobertura da terra do município de Acari/RN / Camylla da Silva Dantas. - 2024. 101 f.: il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Biociências, Programa Regional de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA. Natal, RN, 2024.**
- Falcão, H. M. et al. Carbon dioxide fluxes from a degraded woodland in the Brazilian semiarid region. **Forest Ecology and Management**, v. 496, n. 119447, 2021. Disponível em: . <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119447>.
- FERREIRA, Yrving Brandão. **Balanco hídrico climatológico como ferramenta de análise hidroclimática de núcleos de susceptibilidade a desertificação**. 2021. 195 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- Fernandes, Afrânio. **Fitogeografia brasileira: províncias florísticas / Afrânio Fernandes. 3o. ed. Fortaleza: Realce editora e indústria gráfica, 2006.**
- Fujihara, Marco Antonio. **Mercado de carbono: perspectivas global e nacional. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical** Wagner Bettiol, p. 495. 2023.
- FUNCEME. **Zoneamento ecológico-econômico das áreas susceptíveis à desertificação do núcleo I Irauçuba/Centro-Norte. / Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. / Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. - Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2015.**
- HAINES-YOUNG, R.; POTSCHEIN, M. B. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. 2018.**
- HUETE, A. R.; JACKSON, R. D. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. **Remote sensing of environment**, v. 23, n. 2, p. 213-IN8, 1987.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Uso da Terra. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171 p.**
- IPECE – INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. Um retrato do semi-árido cearense. Fortaleza: 2010. IPECE.
- Lima, A. Y. V. et al. Grazing exclusion restores soil health in Brazilian drylands under desertification process. **Applied Soil Ecology**, v. 193, p. 105107, 2024. ISSN 0929-1393. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105107>.

- Maia, S. M. F.; Ogles, S. M.; Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C. Effects of land-use change on ecosystem carbon dynamics in a seasonally dry tropical forest of the Brazilian Northeast. *CATENA*, v. 81, n. 1, p. 1-7, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.004>.
- Maia, R. P.; Bezerra, F. HR. Condicionamento estrutural da relevância no Nordeste setentrional brasileiro. *Mercator (fortaleza)*, v. 127-141, 2014.
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis**. Washington: World Resources Institute, 2005. 57 p.
- Mendes, K. R. et al. The caatinga dry tropical forest: A highly efficient carbon sink in South America. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 369, p. 110573, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110573>
- Moro, F. M.; Macedo, M. B.; Moura-fê, M. M.; Castro, A. S. F.; Costa, R. C. da. Vegetação, unidade fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. *Revista Rodrigués*, Rio de Janeiro, v. 66, n. 3, p. 717-743, 2015.
- Niemeyer, J.; Vale, M. M. Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. *Land Use Policy*, v. 122, p. 106385, 2022. ISSN 0264-8377. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106385>.
- NISHIWAKI, A. A. M. **Uso do LIDAR e a potencialidade de geração de renda mediante pagamento por serviço ambiental de sequestro de carbono na floresta tropical sazonalmente seca / Adriana Aparecida Megumi Nishiwaki**. – 2023. 222 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2023.
- Oliveira, P. J. L. de; Guedes, J. F.; Costa, D. F.da S.. Serviços ecossistêmicos de regulação em uma bacia hidrográfica no semiárido do Brasil. *Mercator (Fortaleza)*, v. 21, p. e21028, 2023.
- Oliveira, M. L. de, Dos Santos, C. A., de Oliveira, G., Perez-Marin, A. M., & Santos, C. A. (2021). Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. *Science of The Total Environment*, 792, 148458.
- OLIVEIRA, P. J. L. de. **Métricas de paisagem e serviços ecossistêmicos: uma abordagem geocológica na ESEC- seridó e zona de amortecimento, NE-Brasil**. 2022. Dissertação (mestrado) - Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivo 13: Ação contra a mudança global do clima**. Brasília .2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/13>. Acesso em: 17 out. 2025.
- Oliveira, R. F.; Sampaio, E. V. S. B. **Dynamics of Anthropic Disturbances and Regeneration in the Caatinga Biome: A Case Study in Ceará, Brazil**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 5, p. 2157–2171, 2020.
- 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. In: Green R. O (ed). Summaries of the Ninth JPL Airborne *Earth Science Workshop*, 2000. p. 15-33.
- Reis, A. B. S., Sousa, L. M. D., Santos, F. D. S., & Loiola, M. I. B. (2024). Flora of Ceará, Brazil: Simaroubaceae. *Rodriguésia*, 75, e00532024.
- SALVIANO, J. I. de A.. **Relações entre instabilidades das chuvas e indicadores de produção de lavouras de sequeiro no semiárido cearense, Brasil/ Jamile Ingrid de Almeida Salviano**. - 2021. 130 f.: il. color. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza, 2021.
- Sampaio, E. V. S. B.; Giongo, V.; Silva, G. C.; Menezes, R. S. C. Effects of forest management on carbon stocks in a seasonally dry tropical forest in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 482, p. 118875, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118875>.

Sánchez, L. E. **Avaliação De Impacto Ambiental: Conceitos E Métodos**. 3. Ed. São Paulo: Oficina De Textos, 2020.

SANTOS, D. J.. **Uso da terra, funcionamento ecossistêmico e degradação na Caatinga : o papel do clima e fatores socioeconômicos**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Biociências. Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal, Recife, 2021.

SANTOS, N. M.. **Serviços ecossistêmicos e geodiversidade em áreas de manguezal : um olhar a partir de modelos estatísticos no município de Raposa, Ilha do Maranhão/MA - Brasil** / Nayara Marques Santos. - Natal, 2022. 160 f.

Silva, J. A. da; Santos, C. A. G.; Silva, R. M. da. **Dinâmica da cobertura vegetal e uso do solo no semiárido pernambucano: uma análise multitemporal**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 4, p. 1892-1908, 2020.

Silva, J. N. B., Silva, J. L. B., Ferreira, M. L., & Galvêncio, J. D. (2025). Estimativas do sequestro de carbono em espécies predominantes na vegetação de caatinga: compreendendo a dinâmica do carbono em um bioma semiárido. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 13(2).

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para as metas climáticas brasileiras: Relatório de Análise**. 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 22/08/2025.

Souza, B. I.; Artigas, R. C.; Lima, E. R. V. de. Caatinga e desertificação. *Mercator (Fortaleza)*, v. 14, n. 1, p. 131-150, 2015.

Souza, Marcos J. N. **Bases geoambientais e esboço do zoneamento geoambiental do Estado do Ceará**. In: LIMA, L. C. (Org.). Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará. Fortaleza, CE: FUNECE, 2000. p. 06-103.

Souza, Marcos J. N. **Panorama da degradação ambiental, desertificação e entraves ao desenvolvimento sustentável do Ceará**. In: PINHEIRO, D. R. C. (Org.). Desenvolvimento sustentável: desafios e discussões. Fortaleza, CE:ABC Editora, 2006a, p.33-35.