

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA - UAST
BACHARELADO EM AGRONOMIA

Ana Lyvia Ferreira De Paula Oliveira

**Estimativa da Evapotranspiração Real e Produtividade Primária Bruta na
Caatinga com o uso de dados PlanetScope**

Serra Talhada-PE

2025

Ana Lyvia Ferreira De Paula Oliveira

**Estimativa da Evapotranspiração Real e Produtividade Primária Bruta na
Caatinga com o uso de dados PlanetScope**

Projeto do Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado na Unidade Acadêmica de Serra Talhada da
Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito
básico para conclusão do Curso de Bacharelado em
Agronomia.

Orientador (a): Elisiane Alba

Serra Talhada-PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário: Israel Lacerda do Nascimento – CRB-42317

O48e Oliveira, Ana Lyvia Ferreira de Paula
Estimativa da evapotranspiração real e produtividade primária
bruta na Caatinga com o uso de dados PlanetScope / Ana Lyvia
Ferreira de Paula Oliveira. – Serra Talhada, 2025.
30 f. il.

Orientador(a): Elisiane Alba.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Serra Talhada
- UAST, Bacharelado em Agronomia, Serra Talhada, PE-BR, 2025.

Inclui referências e apêndice.

1. Sensoriamento remoto. 2. Aprendizado do computador. 3.
Evapotranspiração. 4. Meteorologia agrícola. 5. Ecologia. I. Alba,
Elisiane, orient. II. Título.

CDD 630

ANA LYVIA FERREIRA DE PAULA OLIVEIRA

**Estimativa da Evapotranspiração Real e Produtividade Primária Bruta na
Caatinga com o uso de dados PlanetScope**

Projeto do Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado na Unidade Acadêmica de Serra Talhada da
Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito
básico para conclusão do Curso de Bacharelado em
Agronomia.

Aprovado em: 08/08/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dra. Elisiane Alba (Orientadora)
(URFPE/UAST)

Prof. Dr. José Raliuson Inácio Silva (Examinador)
(UFRPE/UAST)

Dr. Airton Alves de Carvalho (Examinador)
(UFRPE/UAST)

Serra Talhada
2025

RESUMO

A evapotranspiração real e a produtividade primária bruta são variáveis ecológicas essenciais para entender o funcionamento dos ecossistemas terrestres, principalmente em regiões semiáridas como a Caatinga. A obtenção contínua de dados de evapotranspiração real e produtividade primária bruta em larga escala pode ser viabilizada por técnicas de sensoriamento remoto, sendo essas informações essenciais para o monitoramento ecológico de ecossistemas semiáridos. Este trabalho teve como objetivo estimar a evapotranspiração real e a produtividade primária bruta da vegetação em área de Caatinga, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e algoritmo de aprendizado de máquina. Os dados de evapotranspiração real e produtividade primária bruta foram coletados mensalmente no período de 2021 a 2023 pelo sistema Eddy Covariance acoplado em torre micrometeorológica, localizada na cidade de Serra Talhada-PE. Os dados espectrais corresponderam a 43 cenas do mesmo período, obtidas pela plataforma PlanetScope com resolução espacial de 3 metros captadas pelo sensor SuperDove. Foi realizado um buffer de 100 m a partir da torre onde foram extraídos valores médios de refletância das bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, a partir das quais foram elaborados 22 índices espectrais. Para modelar e prever as variáveis ecológicas, aplicou-se o algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest, com avaliação baseada no coeficiente de determinação, erro quadrático médio e erro absoluto médio. Os índices RGR e NDRGRI foram as variáveis espectrais que apresentaram melhor correlação com a evapotranspiração, com coeficientes de 0,52 e 0,43, respectivamente, enquanto os índices GOSAVI e GSAVI, apresentaram $r = 0,37$ ao avaliar as respostas para a produtividade primária bruta. A modelagem da evapotranspiração apresentou melhor desempenho ($R^2 = 0,62$; RMSE = 0,9830; MAE = 0,7654) comparado à da produtividade primária bruta ($R^2 = 0,57$; RMSE = 4,1786), indicando maior precisão na estimativa da evapotranspiração. O algoritmo Random Forest, onde demonstrou boa capacidade preditiva, especialmente na predição da evapotranspiração.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Aprendizado de máquina; Random Forest;

ABSTRACT

Actual evapotranspiration and gross primary productivity are key ecological variables for understanding the functioning of terrestrial ecosystems, especially in semiarid regions such as the Caatinga. Continuous, large-scale acquisition of evapotranspiration and gross primary productivity data can be enabled by remote sensing techniques, which provide essential information for ecological monitoring of semiarid ecosystems. This study aimed to estimate actual evapotranspiration and gross primary productivity of Caatinga vegetation using remote sensing techniques and a machine learning algorithm. Field measurements of evapotranspiration and gross primary productivity were obtained monthly from 2021 to 2023 using an Eddy Covariance system installed on a micrometeorological tower located in Serra Talhada, Pernambuco, Brazil. Spectral data were derived from 43 PlanetScope SuperDove scenes with 3-m spatial resolution acquired over the same period. A 100-m buffer around the tower was delineated to extract mean reflectance values from the blue, green, red, and near-infrared bands, from which 22 spectral indices were computed. The Random Forest algorithm was applied to model and predict the ecological variables, and its performance was evaluated using the coefficient of determination, root mean square error, and mean absolute error. The RGR and NDRGRI indices showed the strongest correlations with evapotranspiration ($r = 0.52$ and $r = 0.43$, respectively), while GOSAVI and GSAVI showed the highest correlations with gross primary productivity ($r = 0.37$). Model performance was higher for evapotranspiration ($R^2 = 0.62$; RMSE = 0.9830; MAE = 0.7654) compared with gross primary productivity ($R^2 = 0.57$; RMSE = 4.1786), indicating greater accuracy in estimating evapotranspiration. Overall, the Random Forest algorithm demonstrated good predictive capability, particularly for evapotranspiration estimation.

Keywords: Remote sensing; Machine learning; Random Forest.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVO.....	6
2.1 GERAL.....	8
2.2 ESPECIFICOS	8
3.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
3.1 - Bioma Caatinga.....	9
3.2- Vegetação da caatinga	10
3.3 -Evapotranspiração	11
3.4- Sensoriamento remoto no estudo da vegetação	12
4. MATERIAL E METODOS	14
4.1- Área de estudo	14
4.2- Dados de campo	15
4.3- Dados espectrais	16
4.3- Análise estatísticos.....	17
5. RESULTADOS	18
5.1 Comportamento dos dados de campo	18
5.2 Correlação dados de campo x dados espectrais	20
5.3 Modelagem da ET e GPP	23
6. CONCLUSÃO	28
BIBLIOGRAFIA	28

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, caracterizado por uma vegetação adaptada às altas temperaturas e à escassez de água (Embrapa, 2022). Conforme o estudo de Oliveira et al. (2006), a vegetação da Caatinga apresenta baixa taxa de evapotranspiração tanto na estação seca quanto na chuvosa, devido à limitada disponibilidade hídrica, o que evidencia a forte influência das condições climáticas sobre os fluxos de energia e vapor d'água nesse bioma semiárido.

A evapotranspiração (ET) é o processo combinado de perda de água para a atmosfera, englobando tanto a evaporação da superfície do solo quanto a transpiração das plantas (Carvalho et al., 2022). O conhecimento das perdas por evaporação é a base para se determinar o volume potencial de água disponível, cuja informação é de suma importância no planejamento de políticas de manejo dos recursos hídricos da região (Silva et al., 2005).

Outra propriedade muito importante no estudo da vegetação da Caatinga é a Produtividade Primária Bruta (GPP), na qual a vegetação é uma das grandes responsáveis pela fixação do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, que se dá pelo processo de fotossíntese. Esse gás em excesso na atmosfera pode causar um superaquecimento, consequentemente um desequilíbrio climático no globo (SILVA et al, 2019.) A GPP é um componente do ciclo global do carbono, sendo muito importante no combate ao aquecimento global, visto que o CO_2 é um dos gases de efeito estufa.

No entanto, a obtenção dessas variáveis em campo envolve altos investimentos e dados pontuais sobre a ET e GPP. O sistema Eddy Covariance, por exemplo, conforme descrito por Valente et al. (2024), permite a estimativa precisa e em tempo real, a partir da medição dos fluxos turbulentos entre a vegetação e a atmosfera. No entanto, novas tecnologias têm surgido integrando uma visão espacial com dados associados do campo.

Nesse sentido, o sensoriamento remoto, como destacado por Macedo et al. (2016), fornece dados essenciais para o planejamento e a gestão da água em diferentes escalas geográficas. A combinação dessas abordagens amplia a compreensão do ciclo hidrológico, especialmente em biomas como a Caatinga, onde a disponibilidade hídrica é naturalmente limitada na região. Macedo et al. (2016), também se refere o uso de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado

fundamental no monitoramento dos recursos naturais, fornecendo dados essenciais para o planejamento e a gestão sustentável da água em diferentes paisagens.

Galvínio et al. (2017), apontam uma correlação significativa entre o conteúdo de água na folha e a biomassa da vegetação da Caatinga, sendo que a evapotranspiração também apresenta relação com esses parâmetros, o que reforça a importância de monitorar essas variáveis para compreender os impactos do estresse hídrico sobre a dinâmica ecológica do bioma.

Este trabalho estima a evapotranspiração (ET) e a produtividade primária bruta (GPP) da vegetação da Caatinga por meio de imagens orbitais, com o objetivo de compreender a capacidade desse bioma em realizar tais processos e suas possíveis implicações. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto permite análises contínuas, em larga escala e com baixo custo, configurando-se como uma ferramenta estratégica para o monitoramento ambiental e para reforçar a relevância desse método no estudo de ecossistemas naturais.

2. OBJETIVO

2.1 GERAL

Estimar a evapotranspiração e a produtividade primária bruta da vegetação em área de Caatinga com o uso de imagens de alta resolução espacial e técnicas de aprendizado de máquina.

2.2 ESPECÍFICOS

- Identificar o conjunto de variáveis espectrais (bandas e índices de vegetação) com maiores contribuições no processo de modelagem;
- Avaliar a sensibilidade do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest para modelar a ET e GPP na Caatinga;
- Validar a metodologia de baixo custo para monitoramento da evapotranspiração e GPP na Caatinga;
- Espacializar a distribuição da ET e GPP com base nas imagens para a área de estudo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Bioma Caatinga

Exclusivamente brasileiro, o bioma Caatinga é o principal ecossistema da região nordeste, com uma ampla riqueza de espécies, tratando-se do bioma semiárido mais biodiverso do mundo (MMA, 2022). A Caatinga também tem grande importância econômica e cultural para as comunidades locais, pois ela oferece recursos para diversas atividades, como o extrativismo sustentável de plantas medicinais, a produção de mel, o uso de lenha para consumo doméstico, criação de animais adaptados ao semiárido. Essas atividades, quando realizadas de forma sustentável, ajudam a preservar o bioma e oferecem alternativas de renda para a população local.

Embora a Caatinga desempenhe um papel de grande importância econômica, cultural e ambiental, as atividades antrópicas são muito comuns e causam grandes prejuízos para o bioma, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2021). Nesse sentido, a plataforma Mapbiomas (2022) demonstrou estudos que mostram o processo de transformação na Caatinga entre os anos de 1985 e 2021, no qual, 25,59% de todas as áreas do bioma que foram modificadas pela ação do homem, passaram por esse processo nos últimos 36 anos. Esse processo de modificação ameaça a biodiversidade local e compromete a capacidade do bioma de regular o clima, além de agravar a escassez de recursos hídricos, um problema específico da região semiárida.

Cerca de 27 milhões de pessoas vivem atualmente na área original da Caatinga, sendo que 80% de seus ecossistemas originais já foram alterados, principalmente por meio de desmatamentos e queimadas (MMA, 2022). Se faz necessário buscar formas para preservação da Caatinga pois ela é fundamental para a sustentabilidade ambiental e o equilíbrio ecológico do Nordeste. A Caatinga é um ecossistema único no mundo, conhecido por sua biodiversidade adaptada ao clima semiárido, com espécies de plantas e animais que são encontradas neste no bioma.

O programa para o meio ambiente (UNO, 2024) disponibilizou um relatório sobre a lacuna de emissões de gases de efeito estufa, o aumento da implantação de medidas climáticas voltadas para as florestas pode gerar um potencial de redução dos

gases do efeito estufa em 2035. A Preservação do bioma caatinga é de suma importância para manutenção de outros biomas, já que o ciclo biológico é um sistema onde um componente auxilia na manutenção e existência dos demais (Silva, 2019). A caatinga desempenha funções ambientais essenciais, como a regulação do solo, a retenção de umidade e o armazenamento de carbono, contribuindo para o combate ao aquecimento global.

3.1.1 Vegetação da Caatinga

Segundo o Ministério de Turismo (2023), a Caatinga é encontrada nas regiões Nordeste e Sudeste, mais especificamente nos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e no norte de Minas Gerais. Grande parte da Caatinga possui clima semiárido, marcado por temperaturas médias elevadas (entre 25° e 30°C) e baixa precipitação (entre 400 e 1200 mm anuais), entretanto, nos planaltos, as temperaturas médias podem ser mais baixas e a precipitação pode chegar a 1800 mm por ano (TABARELLI et al., 2018).

A vegetação típica da Caatinga, por sua vez, faz parte de um outro bioma global denominado de Florestas e Arbustais Tropicais Sazonalmente Secos (FATSS). Essas plantas desenvolveram adaptações para sobreviver às condições adversas que incluem precipitação irregular e secas recorrentes, a característica mais marcante é a deciduidade da maior parte de suas árvores e arbustos (Fernandez, Queiroz, 2018). Apesar das condições desafiadoras, ela abriga uma vasta quantidade de espécies de plantas e animais, muitas das quais são encontradas nessa região.

Outras modificações na sua vegetação podem ser destacadas como as raízes profundas para buscar água no subsolo ou ainda para armazenar água em sua raiz, como na raiz do umbuzeiro (*Spondias tuberosa*) (Embrapa, 2002). A presença dessa vegetação é essencial para o ecossistema, pois as plantas desempenham papéis fundamentais, como a proteção do solo contra a degradação, que é muito comum em regiões secas (Embrapa, 2007).

Além disso, estudos apontam que a vegetação da Caatinga apresenta mecanismos fisiológicos altamente adaptativos, como folhas pequenas, cutículas espessas, fechamento dos estômatos nas horas mais quentes e estruturas de armazenamento de água em raízes e caules, o que permite sua sobrevivência em ambientes de alta radiação solar e baixa umidade (KIILL, 2021).

A importância ecológica da vegetação da Caatinga também está relacionada à sua capacidade de atuar como sumidouro de carbono. Segundo Costa e Scala Jr. (2024), em anos de maior precipitação, a vegetação responde com intensa atividade fotossintética, contribuindo significativamente para o sequestro de CO₂ da atmosfera, o que reforça seu papel na regulação climática e na mitigação dos efeitos das mudanças ambientais.

3.2 Evapotranspiração

A evaporação é um processo físico em que a água líquida se transforma em vapor, sendo removida da superfície evaporante, o que ocorre em ambientes como solos, corpos hídricos e vegetação úmida. Esse processo depende da energia fornecida, principalmente pela radiação solar e pela temperatura do ar, além de fatores atmosféricos como a umidade e a velocidade do vento, que favorecem a remoção do vapor da superfície (FAO, 1998).

Estudos apontam que, nas últimas décadas, houve tendência de aumento da evapotranspiração no semiárido brasileiro, especialmente em áreas centrais do Nordeste, o que pode estar associado ao aumento das temperaturas e à redução da umidade relativa do ar (Santos et al, 2020). A escassez de água é uma das principais limitações enfrentadas pelas regiões semiáridas, como o Agreste Pernambucano, onde a irregularidade das chuvas e a elevada demanda hídrica tornam essencial o uso eficiente da água. Nesse cenário, a estimativa da evapotranspiração surge como ferramenta estratégica para otimizar o manejo dos recursos hídricos e garantir a sustentabilidade da produção agrícola (Andrade et al, 2023).

Oliveira (2023) enfatiza que a evapotranspiração desempenha um papel decisivo na modelagem hidrológica de regiões semiáridas, pois sua variabilidade afeta diretamente a estimativa das vazões simuladas. Também a autora destaca que a escolha da base de dados para estimar a evapotranspiração, como produtos meteorológicos oficiais ou estimativas globais baseadas na equação de Penman-Monteith pode gerar diferenças significativas nos resultados hidrológicos, comprometendo a representatividade local e a calibração dos modelos. Isso se deve à sensibilidade dos modelos hidrológicos a essa variável, considerada uma das principais saídas do sistema, o que reforça a necessidade de dados precisos e espacialmente coerentes com as condições climáticas reais da bacia.

Além disso, Bezerra et al. (2021) destacam que a estimativa da evapotranspiração real diária, especialmente quando feita com apoio de tecnologias como o sensoriamento remoto, tem se mostrado eficaz no gerenciamento dos recursos hídricos de bacias localizadas no semiárido. Essa abordagem permite análises em larga escala, com maior frequência temporal e menor custo, o que a torna uma estratégia promissora para a segurança hídrica em regiões vulneráveis.

3.3 Sensoriamento remoto no estudo da vegetação

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que dispõe de sensores imageadores, possibilitando a observação de forma rápida e prática da vegetação sem a necessidade de visitas frequentes ao campo. Segundo Oliveira et al. (2022), os métodos de sensoriamento remoto permitem integrar informações sobre os vários processos físicos e biológicos em diferentes escalas de tempo e espaço. Com o avanço tecnológico das últimas décadas, tornou-se possível a estimativa precisa de propriedades biofísicas e das necessidades hídricas das culturas agrícolas em tempo real através das abordagens de sensoriamento remoto utilizando imagens de satélites e veículos não tripulados (Neale et al., 2022).

Essa evolução tecnológica também tem sido aplicada em grandes projetos científicos, como o Projeto LBA, que utilizou sensores multiespectrais para estudar o funcionamento dos ecossistemas amazônicos e os impactos das mudanças climáticas, demonstrando o potencial do sensoriamento remoto para compreender processos ecológicos em larga escala (Novo et al., 2005).

Dado o emprego de sensores ópticos que registram rotineiramente dados em diferentes escalas, os fluxos de dados gerados gradualmente se tornaram uma fonte bem estabelecida de informações em uma ampla gama de aplicações de monitoramento de vegetação, como avaliação do impacto das mudanças climáticas e modelagem de carbono (Lisbinski et al., 2020). Os produtos obtidos a partir de sensores captam dados sobre a superfície terrestre, possibilitando informações que permitem a análise da cobertura vegetal, saúde das plantas, que podem incluir na identificação de estresse hídricos, ataques de pragas, também por meio de estudos conseguimos analisar tendências de desmatamento, medidas de fluxo de Carbono, entre outros.

No contexto brasileiro, programas como o BiomasBR, conduzidos pelo INPE, têm utilizado imagens de satélite para monitorar a vegetação nativa em biomas como Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, contribuindo para ações de conservação e políticas públicas ambientais (Almeida et al., 2025).

Devido a capacidade dessas técnicas de ser utilizado em diversas linhas de pesquisa e atuação a sua versatilidade de proporcionar um maior monitoramento das áreas, tem sido um grande aliado no acompanhamento do processo de degradação de muitos biomas (Silva., 2019.) O monitoramento contribui para a gestão mais eficiente, pratica e precisa, tornando o tempo do produtor rural mais eficaz, disponibilizando mais facilidade e segurança durante todo o processo de produção.

3. 4 Produtividade primária bruta (GPP)

A vegetação é uma das grandes responsáveis pela fixação do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, que se dá pelo processo de fotossíntese. (Silva et al, 2019.) A produtividade primária bruta- (GPP) é um componente do ciclo global do carbono formado durante o processo de fotossíntese, através da absorção de dióxido de carbono (CO_2) pelas plantas é importante e para o combate ao aquecimento global, visto que o dióxido de carbono (CO_2) é um dos gases de efeito estufa (GEE).

A avaliação da produtividade primária bruta (GPP) é essencial para estudos sobre mudanças climáticas, ciclo do carbono, recursos hídricos e produção agrícola, pois está diretamente relacionada à captura de carbono atmosférico e à sua fixação nos ecossistemas terrestres. Pesquisas recentes têm buscado aprimorar a estimativa da GPP em diferentes regiões do Nordeste brasileiro, utilizando dados meteorológicos e satelitários para identificar padrões e tendências ambientais (Santos et al., 2023).

O conhecimento da produtividade primária bruta tem muita importância para compreender os fluxos de energia nos ecossistemas agrícolas, permitindo avaliar o potencial de fixação de carbono e orientar práticas sustentáveis de manejo, especialmente em regiões semiáridas onde os recursos naturais são limitados (SILVA et al., 2013).

Com o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto, tornou-se possível estimar a PPB de forma espacializada e precisa. Segundo Silva et al. (2013), a utilização de imagens do satélite Landsat 5, aliadas a dados meteorológicos, possibilitou calcular a radiação fotossinteticamente ativa e a eficiência de uso da luz

pela vegetação no perímetro irrigado de São Gonçalo, na Paraíba. Essa abordagem permitiu mapear a produtividade da área e identificar variações associadas ao uso da terra e à disponibilidade hídrica.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é um órgão das Nações Unidas que produz estudos científicos sobre as mudanças climáticas, onde se refere que as ações humanas são responsáveis pelo aumento da temperatura na Terra, as técnicas de sensoriamento remoto são importantes para estimar a concentração de (CO₂) captada pelas plantas e compreensão do comportamento da vegetação e a contribuição destas vegetações para favorecimento captação do fluxo de carbono. Neste sentido os estudos sobre o fluxo de carbono tornam-se necessários para uma maior compreensão sobre a captação de carbono na caatinga, pois através de pesquisas desenvolvidas com o uso do satélite REIS/RapidEye, que permite acesso a imagens coletadas com frequência em cinco bandas espectrais nas faixas do azul, verde, vermelho, RedEdge e Infravermelho próximo, o qual facilita o monitoramento do fluxo de carbono em grandes áreas com precisão e continuidade.

Moura et al, (2022) ao analisarem as dinâmicas produtivas e condições ambientais do bioma da caatinga que influenciam nas emissões desses gases, destaca a importância de estudos que avaliem o potencial desse bioma na atuação como emissora ou sumidouro de carbono e outros gases do efeito estufa para promover a conservação e uso sustentável do bioma. Considerando um grande efeito na liberação GEE na atmosfera, como também os danos nas condições climáticas do planeta, é relevante demonstrar a importância que a caatinga exerce na ciclagem do ar.

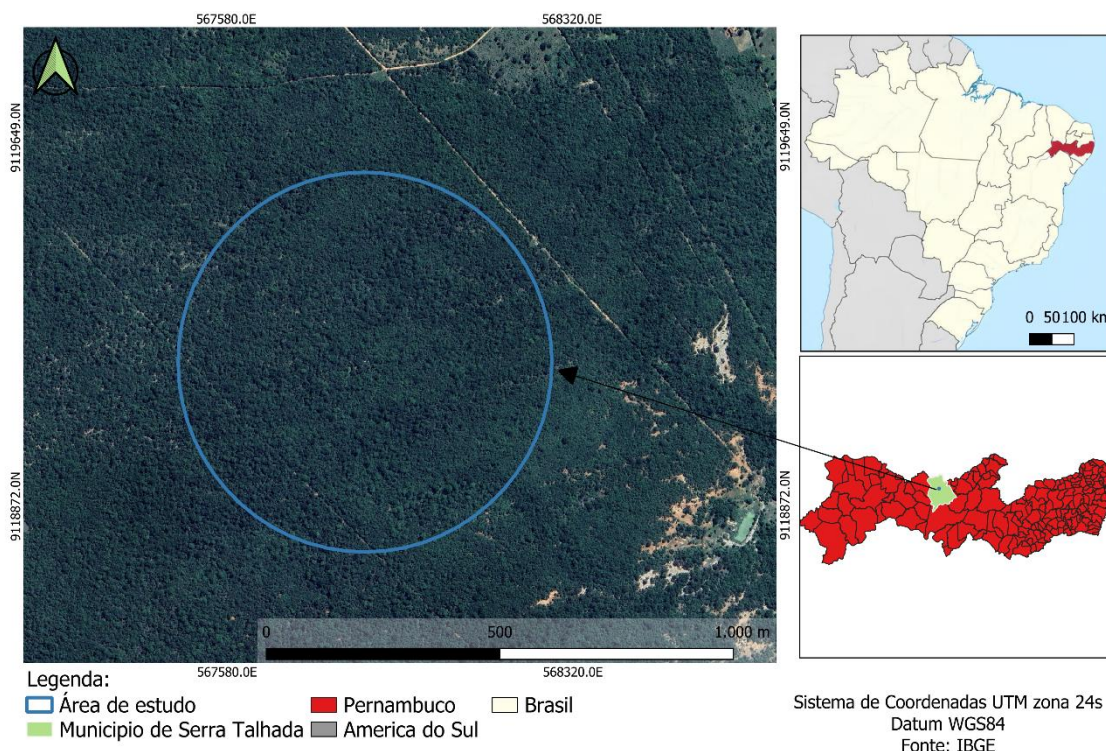
4. MATERIAL E METODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Serra Talhada – PE, pertencente à microrregião do Vale do Pajeú, sob as coordenadas geográficas 7°58'5,2" S e 38°23'2,6" W. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é BShw' (semiárido), com temperatura média diária do ar de 25 °C, apresentação a estação chuvosa compreendendo os meses de dezembro a março e 642 mm de precipitação média anual (SILVA et al., 2017). A vegetação presente no

município de Serra Talhada é recoberta pela Caatinga, também conhecida como vegetação caducifólia espinhosa.

Figura 1- Figura de localização da área de estudo no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brazil.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Dados de campo

A metodologia aplicada neste trabalho para obtenção dos dados de campo baseou-se em medições realizadas por uma torre micrometeorológica equipada com o sistema de Eddy Covariance (LI-7500). Esse sistema mede diretamente os fluxos turbulentos de vapor d'água e dióxido de carbono entre a superfície e a atmosfera, bem como variáveis micrometeorológicas associadas (como temperatura, velocidade e direção do vento). A partir desses fluxos, foram estimadas variáveis ecossistêmicas de interesse, como a evapotranspiração real (ET) e a produtividade primária bruta (GPP). O sistema de Eddy Covariance foi instalado a 10 metros de altura, registrando medidas na frequência de 10 Hz (0,1 s), sendo processadas e armazenadas a cada 30 minutos pelo SmartFlux3. Foram utilizados os programas EddyPro7 para o pré-

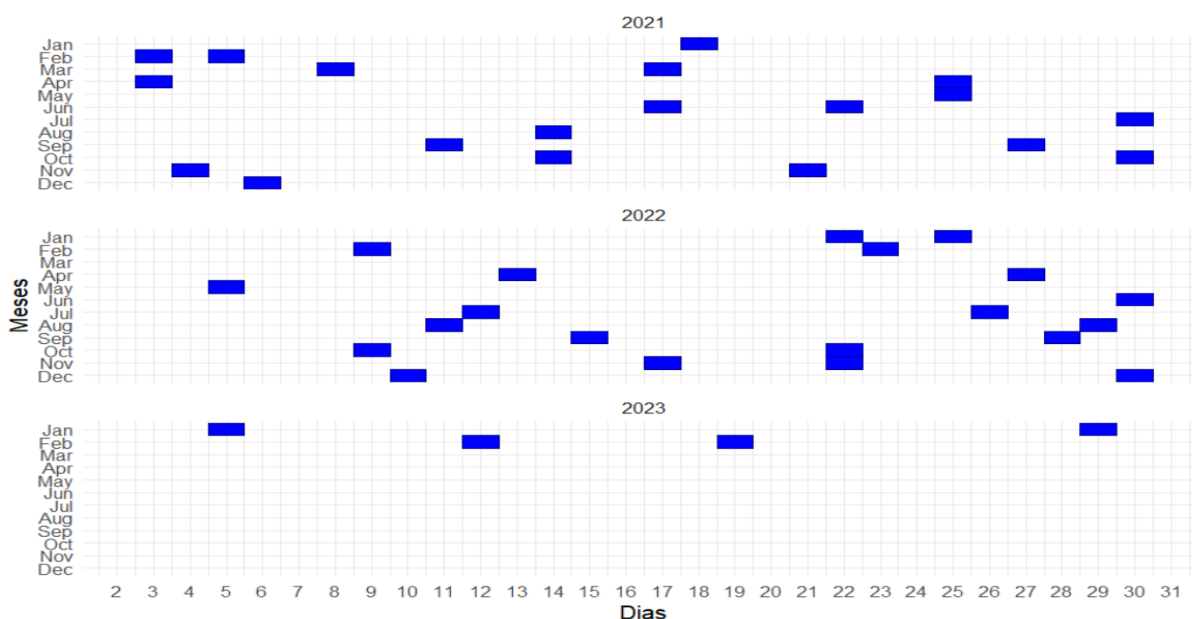
processamento e determinação dos fluxos e o RedyProc para realizar o pós-processamento, correções, preenchimento de falhas e determinação da GPP.

4.3 Dados espectrais

Os dados espectrais corresponderam às imagens de alta resolução espacial, do sensor SuperDove com imagens de 3 m de pixel, disponibilizadas pela plataforma PlanetScope. Por meio do registro acadêmico, foi possível acessar as imagens de forma gratuita, representadas já em valores de reflectância de superfície. As imagens foram adquiridas com frequência mensal, no período de janeiro de 2021 a fevereiro de 2023, nas faixas espectrais do azul, verde, vermelho e Infravermelho próximo, correspondente as bandas B1, B2, B3 e B4, respectivamente. Em alguns meses, obteve-se mais de uma cena devido à ausência de nuvens (Figura 2).

Para a extração da reflectância das imagens, utilizou-se um buffer de 100 metros de raio, tomando como referência a torre, já que essa era a área em que os sensores de campo conseguem captar a ET e a GPP de forma eficiente. Foi utilizado um script em linguagem R para extrair a refletância dos pixels, a partir dos quais foram realizadas as médias, organizando-se os resultados separadamente para as bandas.

Figura 2- Distribuição de imagens ao longo dos meses no período de 2021 a 2023.



Fonte: Próprio autor.

A partir das bandas espectrais da região do visível e infravermelho próximo, foi possível a elaboração de diversos índices de espectrais. Os índices estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1- Índices espectrais elaborados no presente estudo.

Sigla	Nome	Equação
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$
EVI2-2	Enhanced Vegetation Index	$2.5 \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 2.4 \times \text{RED} + 1)$
GSAVI	Green Soil-Adjusted Vegetation Index	$1.5 \times (\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN} + 0.5)$
Clgreen	Green Chlorophyll Index	$\text{NIR} / \text{GREEN} - 1$
MCARI1	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 1	$1.2 \times (2.5 \times (\text{NIR} - \text{RED}) - 1.3 \times (\text{NIR} - \text{GREEN}))$
GDVI	Green Difference Vegetation Index	$\text{NIR} - \text{GREEN}$
NDRGRI	Normalized Difference Red/Green Redness Index	$(\text{RED} - \text{GREEN}) / (\text{RED} + \text{GREEN})$
GRVI	Green Ratio Vegetation Index	$\text{NIR} / \text{GREEN}$
RVI	Ratio Vegetation Index	NIR / RED
DVI	Difference Vegetation Index	$\text{NIR} - \text{RED}$
RGR	Red-Green Ratio	$\text{RED} / \text{GREEN}$
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + 0.5) \times (1 + 0.5)$
GOSAVI	Green Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN} + 0.16) \times (1 + 0.16)$
OSAVI	Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + 0.16) \times (1 + 0.16)$
EVI2	Enhanced Vegetation Index 2	$2.4 \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + 1)$
LogR	Logarithmic Ratio	$\log(\text{NIR} / \text{RED})$
SQRT(IR/R)	Square Root Ratio	$\sqrt{(\text{NIR} / \text{RED})}$
DVIMSS	Differenced Vegetation Index MSS	$2.4 \times \text{NIR} - \text{RED}$
SBL	Soil Background Line	$\text{NIR} - 2.4 \times \text{RED}$
PVR	Photosynthetic Vigour Ratio	$(\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED})$

4.3 Análise estatísticas

Inicialmente foi realizado a correlação de Pearson, verificando a magnitude da relação das variáveis explicativas (bandas espectrais e índices) com as variáveis de campo (ET e GPP). A modelagem das variáveis foi realizada por meio do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest (RF). Para garantir maior estabilidade nos

modelos, realizou-se um teste com múltiplas sementes (variando de 1 a 500), com o objetivo de identificar a melhor configuração em termos de desempenho preditivo.

O algoritmo foi configurado de acordo com os parâmetros específicos de forma a melhor explorar as variáveis espectrais (faixas e índices) na predição da variável de campo. Posteriormente foi feita a modelagem na linguagem de programação R, no software RStudio. Os demais processamentos da imagem e a organização do layout dos mapas foram realizados no software QGIS.

As estimativas foram validadas a partir de métricas de erro que determinaram o grau de associação entre os produtos gerados a partir do levantamento convencional e aqueles observados em campo. A avaliação dos modelos foi conduzida por meio de validação cruzada com 6 partições, e os seguintes indicadores de desempenho foram considerados: o coeficiente de determinação (R^2), que indica a proporção da variabilidade dos dados observados explicada pelo modelo; a raiz do erro quadrático médio (RMSE, *Root Mean Square Error*), que expressa a magnitude média dos erros em relação às unidades originais da variável; e o erro absoluto médio (MAE, *Mean Absolute Error*), que representa a média dos valores absolutos das diferenças entre valores observados e estimados.

Para a estimativa da evapotranspiração real (ET), o modelo apresentou R^2 de 0,61, com RMSE de 0,9830 mm/dia e MAE de 0,7654 mm/dia. Os valores próximos de RMSE e MAE indicam que os erros foram distribuídos de forma relativamente uniforme, sem forte influência de valores extremos. Para a produtividade primária bruta (GPP), o R^2 foi de 0,58, com RMSE de 4,1786 g C m⁻² dia⁻¹ e MAE de 3,5643 g C m⁻² dia⁻¹, também apresentando baixa discrepância entre os dois indicadores de erro. Esses resultados indicam desempenho moderado do modelo, coerente com a complexidade dos processos da Caatinga e com a variabilidade ambiental característica do bioma.

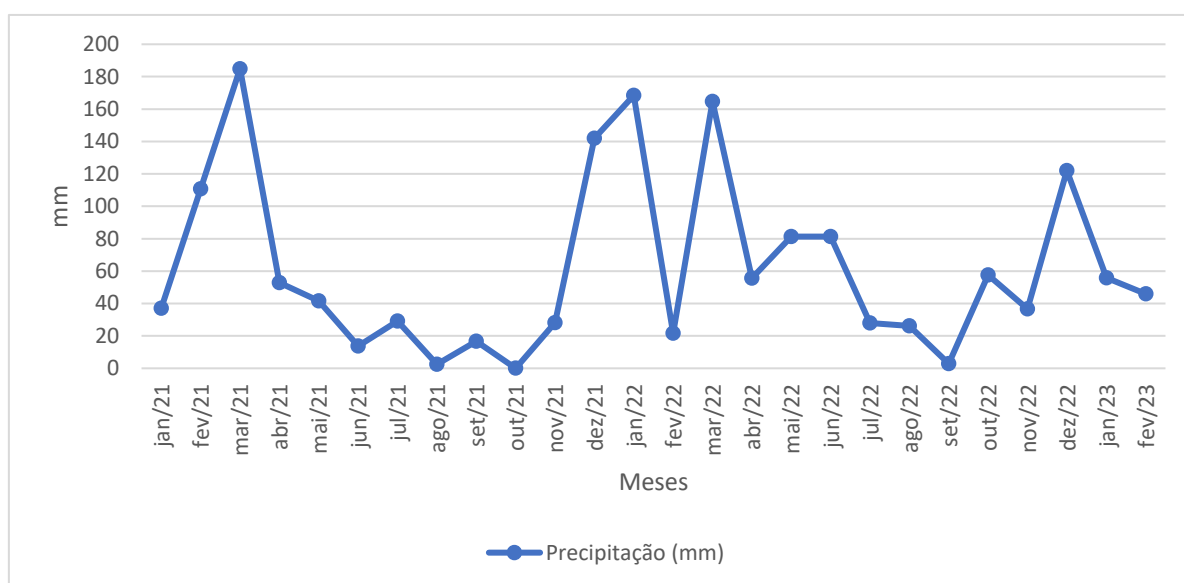
5. RESULTADOS

5.1 Comportamento dos dados de campo

As Figuras 3 e 4 apresentam os dados, ET e GPP para as datas das imagens selecionadas. Observou-se que os picos de GPP ocorrem após aumentos

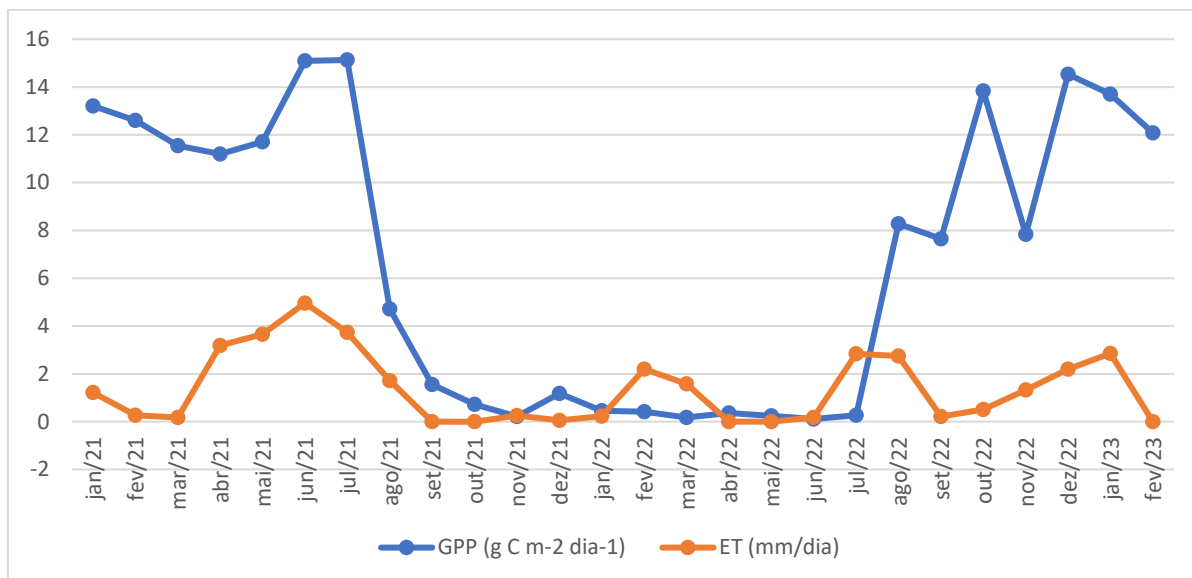
significativos nos níveis de precipitação. Esse comportamento mostra a dependência direta do GPP em relação à disponibilidade hídrica no ecossistema semiárido da Caatinga. Como a fotossíntese que é a base pro GPP e esta depende fortemente da água disponível para as plantas, é esperado que em períodos chuvosos a atividade fotossintética aumente. Esse aumento na atividade vegetal não apenas eleva os valores de GPP, mas também influencia diretamente a evapotranspiração, já que a maior umidade do solo e o incremento na biomassa promovem maior liberação de vapor d'água para a atmosfera. Assim, tanto o GPP quanto a ET responde de maneira significativa às variações de precipitação, revelando o papel essencial da água como reguladora dos processos ecossistêmicos na Caatinga.

Figura 3- Dados mensais de precipitação no período de janeiro de 2021 a fevereiro de 2023.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4- Dados mensais de ET e GPP no período de janeiro de 2021 a fevereiro de 2023.



Fonte: Próprio autor.

A estatística descritiva dos dados de campo (Tabela 3) evidenciou que os valores de evapotranspiração (ET) variaram de 0,03 a 4,96 mm dia⁻¹, com média de 1,26 mm dia⁻¹. Já os valores de produtividade primária bruta (GPP) apresentaram maior amplitude dentro de sua própria escala, variando de 0,11 a 15,13 gC m⁻² dia⁻¹, com média de 5,73 gC m⁻² dia⁻¹. O desvio padrão do GPP foi de 5,09 gC m⁻² dia⁻¹, indicando elevada variabilidade na resposta da vegetação, possivelmente associada à dinâmica hídrica da Caatinga. Embora não seja possível comparar diretamente os valores de ET e GPP devido às diferentes unidades de medida, ambos os parâmetros refletem aspectos importantes do funcionamento ecossistêmico e da influência das condições ambientais sobre a vegetação.

Tabela 3 – Estatística descritiva dos dados de campo de ET e GPP.

Parâmetro	ET (mm dia ⁻¹)	GPP (gC m ⁻² dia ⁻¹)
Valor mínimo	0,03	0,11
Valor máximo	4,96	15,13
Média	1,26	5,73
Mediana	0,95	4,33
Desvio Padrão	1,34	5,09

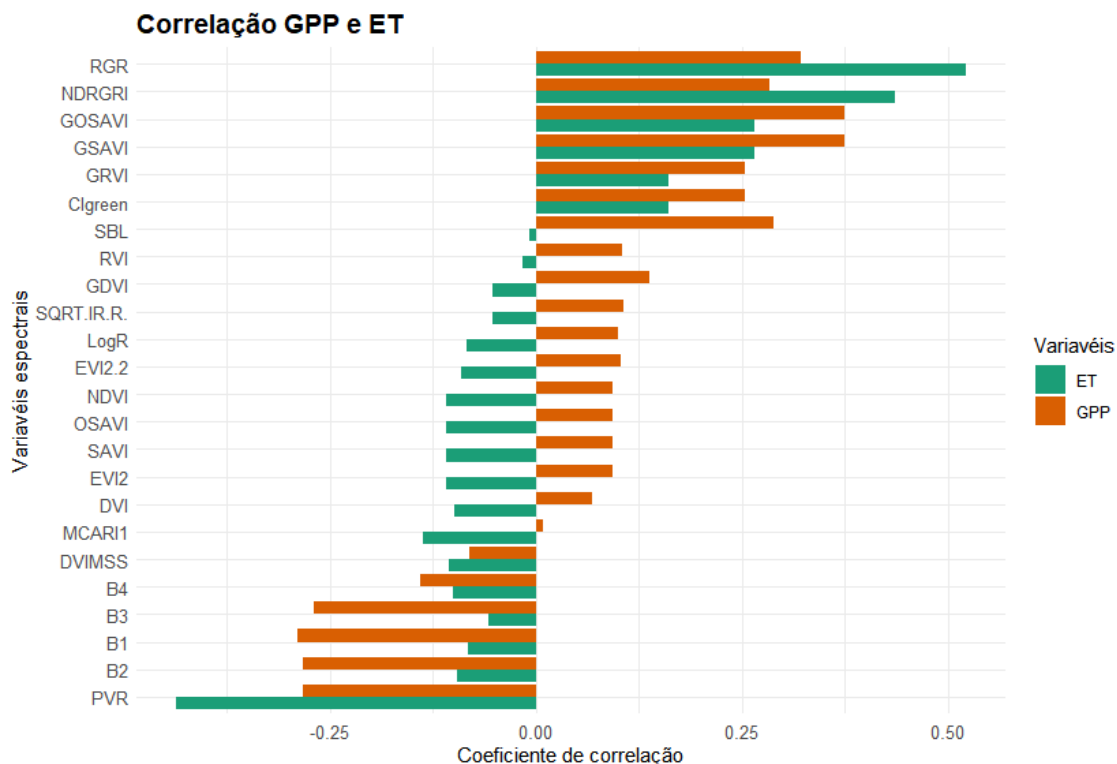
5.2 Correlação dados de campo x dados espectrais

Na Figura 5 observa-se a relação entre a ET e GPP com as bandas e índices espectrais, destacando-se os índices RGR e NDRGRI, como os de maior correlação com ET, apresentando $r=0,52$ e $r= 0,43$, respectivamente. O índice RGR refere-se à razão entre as bandas espectrais vermelha e verde, sendo utilizado para inferir, de forma indireta, aspectos relacionados à coloração da vegetação (INDEX DATABASE, 2023).

Ambos os índices não mensuram a clorofila de forma direta, mas capturam características espectrais vinculadas à pigmentação foliar. Essa capacidade de detecção de padrões relacionados à coloração pode justificar o destaque dos índices em relação aos demais avaliados, uma vez que apresentam maior resposta frente às variações na evapotranspiração da vegetação.

O índice PVR, teve um valor negativo, superando $r=-0,40$ na ET. Apesar de alguns índices espectrais apresentarem valores positivos que indicam características diretas relacionadas à presença de clorofila, como densidade foliar e coloração verde, a correlação negativa observada entre o índice PVR e a ET sugere uma condição fisiológica distinta. Folhas maduras com pigmentação preservada, mas apresentando baixa atividade fotossintética, reduz a liberação de vapor d'água para a atmosfera, mesmo diante de estrutura foliar aparente.

Figura 5 – Análise de correlação entre a ET e GPP com as bandas espectrais e índices.



Fonte: Próprio autor.

O GPP, que representa o total de carbono fixado pela vegetação através da atividade fotossintética, está intrinsecamente ligada à capacidade funcional das plantas e à sua estrutura foliar. Assim, os índices GOSAVI e GSAVI, que estão relacionados com ajuste da influência do solo na resposta espectral, apresentaram maior correlação com a variável de campo, demonstrando relação direta com coeficiente de correlação no valor de 0,37 para os ambos os índices.

A vegetação da Caatinga possui um dossel heterogêneo, o que inclui a influência do solo na resposta espectral armazenada pelos sensores. Nesse aspecto, para o estudo GPP, incluir variáveis que minimizem a influência do solo melhora as respostas para os processos biofísicos. Assim, a utilização de índices, como o GOSAVI e o GSAVI, mostra-se adequado para ambientes com cobertura vegetal descontínua, como a Caatinga.

Qi et al. (1994) descreveram os alguns índices para minimizar a influência do solo na resposta espectral da vegetação, incorporando um fator de ajuste ao denominador da equação que avalia a diferença normalizada entre bandas espectrais. Esses índices continuam se mostrando altamente importantes quando associados imagens espectrais na descrição de fatores biofísicos em campo.

Os índices espectrais NDRGRI e RGR demonstraram sensibilidade também positiva em relação à GPP, porém apresentando uma fraca correlação, próxima de 0,25.

5.3 Modelagem da ET e GPP

Para a modelagem foi aplicada a técnica de aprendizado de máquina por meio do algoritmo Random Forest para prever a ET e o GPP via sensoriamento remoto (Tabela 2). Observou-se que o modelo de estimativa da ET apresentou um R^2 de 0,62, associado a um RMSE no valor de 0,9830 mm dia⁻¹ e MAE de 0,7654 mm/dia. De modo semelhante, a estimativa da GPP por meio da mesma abordagem apresentou um R^2 de 0,57, com RMSE de 4,1786 g C m⁻² dia⁻¹ e MAE de 3,5643 g C m⁻² dia⁻¹, refletindo desempenho moderado em ambas as estimativas.

O valor obtido para o modelo de ET foi superior ($R^2 = 0,61$) em comparação ao modelo de GPP ($R^2 = 0,57$), demonstrando englobar maior propor da variabilidade de campo da variável resposta.

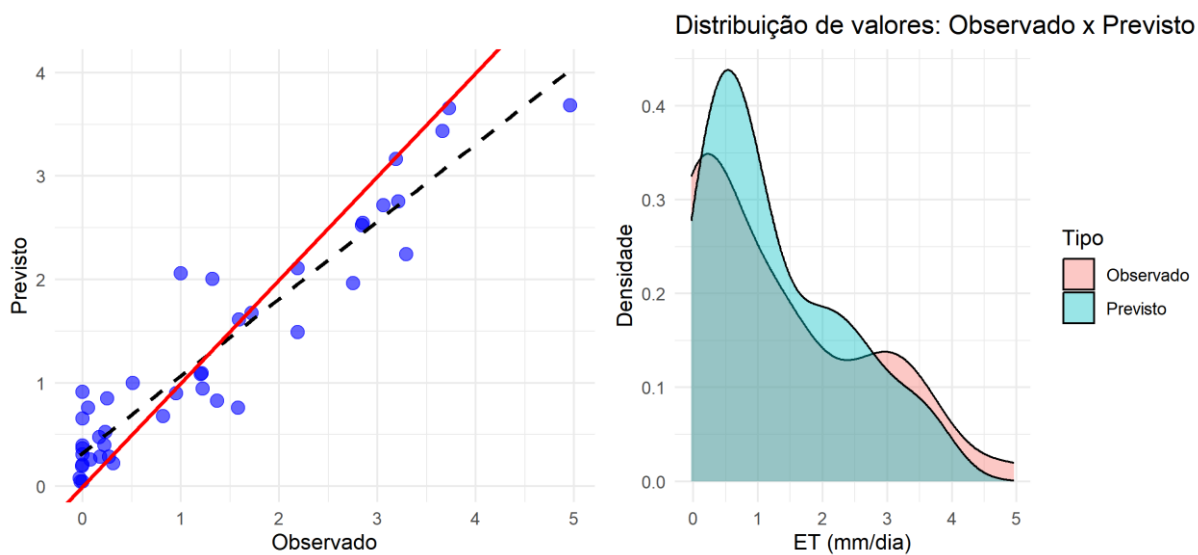
Tabela 2- Métricas obtidas pelo modelo gerado a partir do RF para estimativa da ET e GPP.

Variável	R^2	RMSE	MAE
ET (mm/dia)	0,61	0,9830	0,7654
GPP (g C m ⁻² dia ⁻¹)	0,58	4,1786	3,5643

Apesar do ajuste dos modelos de predição das variáveis de campo não conseguirem descrever 70% da variabilidade de campo ($R^2 < 0,70$), observou que o modelo, em geral, consegue acompanhar o comportamento dos dados observados, com uma boa correlação entre os valores previstos e os reais. Para os dias em que a ET é mais baixa, o modelo representou maiores acertos, expondo que os resultados previstos ficam próximos dos observados. No entanto, o modelo apresenta maiores erros na estimativa de valores de ET mais elevados, subestimando os valores reais, conforme demonstra na Figura 6.

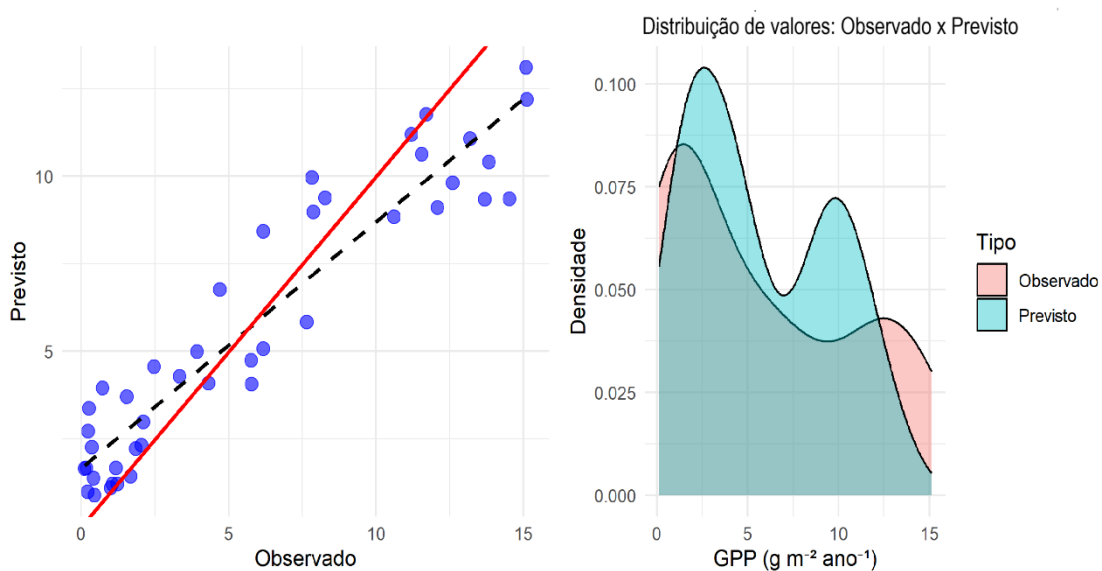
Na Figura 7, o gráfico de dispersão entre os valores observados e previstos para o GPP, o qual demonstra o mesmo comportamento descrito acima, apresentando boas previsões quando os valores de GPP são medianos a baixos.

Figura 6- Distribuição de valores observados e previsto de ET pelo modelo RF.



Fonte: Próprio autor.

Figura 7- Distribuição de valores observados e previsto de GPP pelo modelo RF.

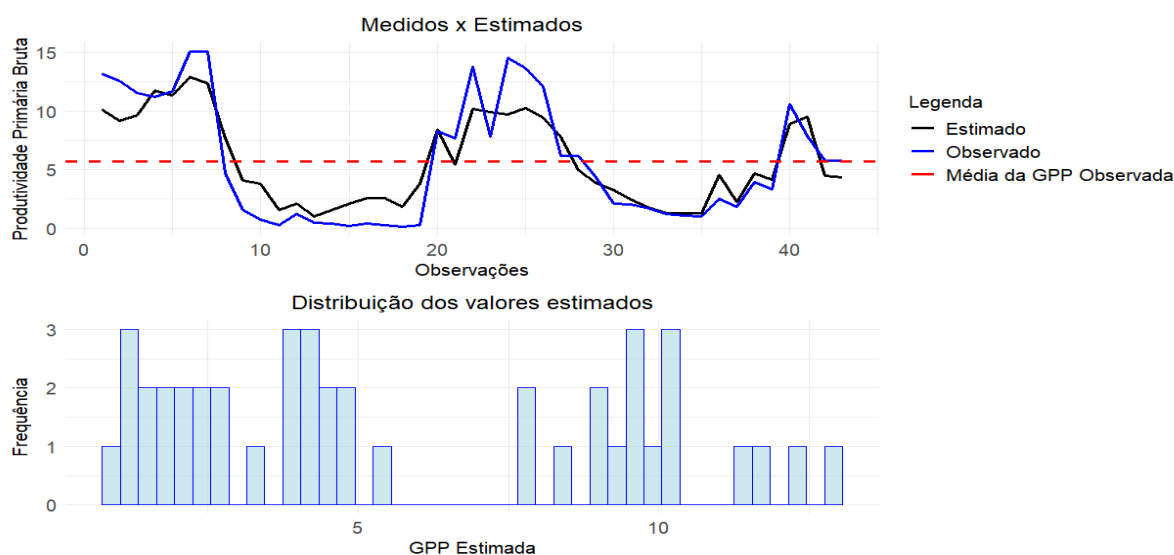


Fonte: Próprio autor.

De modo geral, à medida que os valores de campo aumentam, o modelo tende a subestimar, o que pode ser atribuído à baixa representatividade de amostras com valores mais elevados de ET e GPP durante o treinamento do modelo. A maior parte das amostras representaram valores medianos a baixo e como o método estabelece a divisão das amostras em treino e teste, há a necessidade de uma amostragem intensa ao longo da escala de abrangência dos valores de campo.

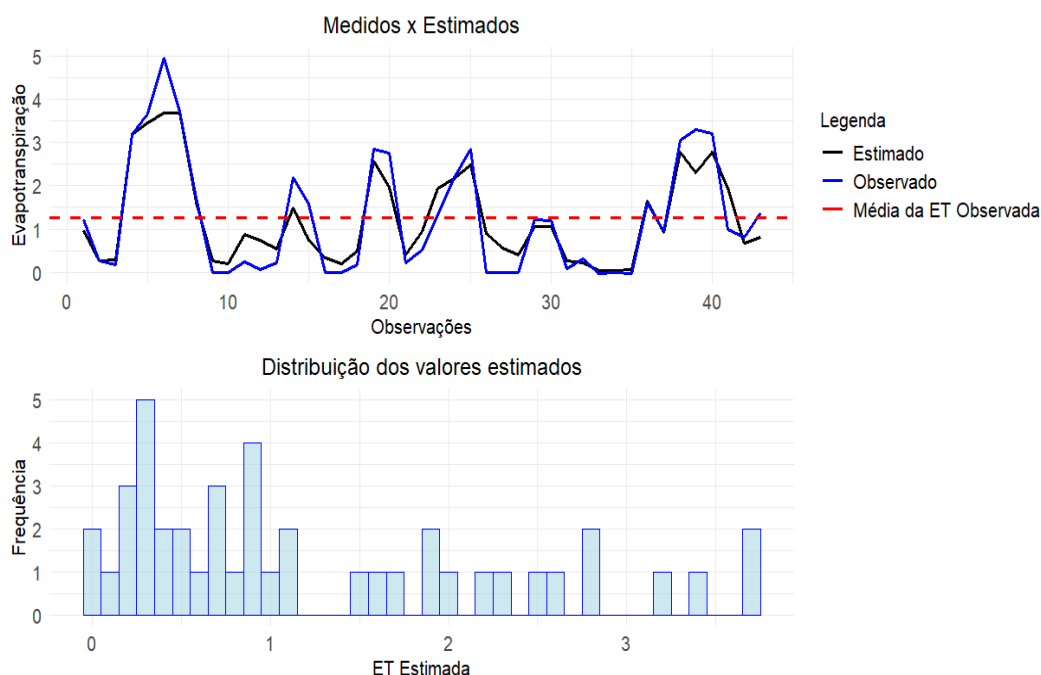
As figuras 8 e 9 abaixo mostram a comparação entre os valores observados em campo e os valores estimados da ET e GPP em uma área de caatinga. Podemos observar que a linha estimada acompanhada de forma consistente a linha dos valores observados, indicando que o modelo apresenta boa precisão na estimativa dos dados conhecidos. A linha vermelha tracejada representa a média dos valores observados, funcionando como referência para avaliar se o modelo tende a superestimar ou subestimar os valores. As estimativas foram obtidas por meio do algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest (RF), que demonstrou desempenho satisfatório na modelagem dos dados dessa vegetação semiárida.

Figura 8- Comparação de GPP medida e estimada



Fonte: Próprio autor.

Figura 9- Comparação de ET medida e estimada

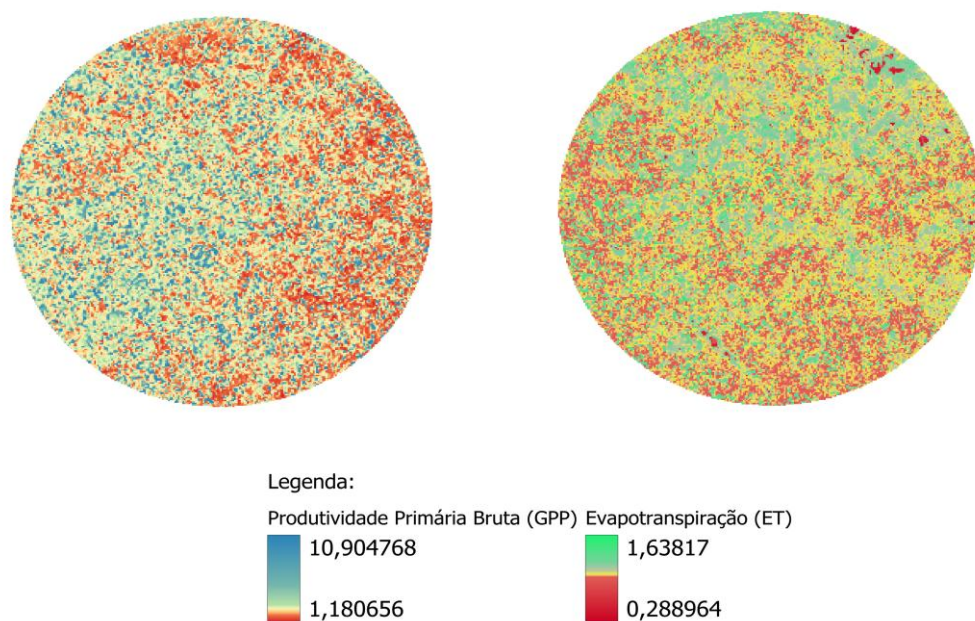


Fonte: Próprio autor.

No GPP observamos picos das frequências correm próximos de 1, 4 e valores próximos a 10 ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Na ET podemos ver que a maior parte dos valores estimados está concentrada na faixa de 0 a 0,8 mm/dia, o que indica que o modelo geralmente estima valores baixos de ET.

Na Figura 10, mostra o comportamento da vegetação na área de estudo a partir de duas variáveis de campo a Produtividade Primária Bruta (GPP) e a Evapotranspiração (ET). Os valores de GPP variam de 1.18 a 10.90, refletindo desde zonas com baixa atividade fotossintética até áreas com maior fixação de carbono, associadas à vegetação mais vigorosa. Já os dados de ET, que vão de 0.28 a 1.63, indicam o volume de água transferido para a atmosfera por evaporação do solo e transpiração das plantas. Em alguns períodos, GPP e ET mostram uma relação ao valores subirem juntos, o que pode indicar que a vegetação está ativa e liberando mais água para a atmosfera. Mas essa relação não é constante, há momentos em que uma variável aumenta e a outra não acompanha. Isso mostra que fatores como clima, tipo de vegetação e disponibilidade de água também influenciam esses dados.

Figura 10- Espacialização da GPP e ET.



Fonte: Próprio autor.

Essas observações mostram como é importante analisar em conjunto as variáveis usadas na estimativa da GPP e da ET para entender melhor a dinâmica ecológica na Caatinga. O uso de imagens de alta resolução para estimar a GPP tem se mostrado uma ferramenta valiosa para compreender o funcionamento dos ecossistemas, como destacam Alves et al. (2023). Em regiões tropicais sazonalmente secas, como a Caatinga, avaliar a produtividade primária bruta é essencial para entender o balanço de carbono e os impactos das variações climáticas. Nesse sentido, Ferreira et al. (2021) compararam estimativas de GPP obtidas por sensoriamento remoto (produto MOD17A2 – MODIS) com dados micrometeorológicos coletados em campo, em uma área preservada de Caatinga. Eles encontraram uma correlação moderada ($r = 0,65$; $R^2 = 0,43$), com melhor desempenho na estação seca. Embora o produto consiga representar bem o padrão anual da GPP, os autores ressaltam que o algoritmo pode ser melhorado para captar com mais precisão as condições locais do bioma. Outros estudos também mostram que a vegetação nativa da Caatinga tem papel fundamental na regulação da evapotranspiração, e que esse processo é sensível a mudanças no uso do solo, como a adoção da agricultura irrigada (Bezerra

et al., 2013). Comparar resultados com pesquisas anteriores ajuda a entender melhor o desempenho do modelo deste estudo e a avaliar seu potencial de uso em aplicações práticas.

Esse tipo de estudo é fundamental para ampliar o conhecimento sobre os processos ecológicos e avaliar os impactos ambientais em diferentes regiões. Segundo Rocha et al. (2023), a estimativa da ET por meio de sensoriamento remoto, utilizando modelos baseados no balanço de energia, representa uma alternativa eficaz para o monitoramento hídrico em diferentes regiões climáticas do Brasil, oferecendo alta precisão e aplicabilidade em escalas locais e regionais. A relação entre essas variáveis pode fornecer informações valiosas sobre o funcionamento dos ecossistemas e desenvolvimento da vegetação para servir como base para estratégias de manejo sustentável para Caatinga.

6. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a combinação de dados de sensoriamento remoto com algoritmos de aprendizado de máquina é eficiente para estimar a evapotranspiração e a produtividade primária bruta na vegetação da Caatinga, apresentando bom desempenho mesmo em cenários com limitações hídricas, característicos do semiárido. Esses resultados contribuem para o aprimoramento de métodos de monitoramento ambiental de baixo custo e oferecem alternativas sustentáveis para a conservação do bioma Caatinga, reforçando o papel da tecnologia como aliada na gestão dos recursos naturais.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R. G. et al. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)*. FAO, 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

ALVES, Wilany Rodrigues Galvão; RUHOFF, Anderson Luis; SOUZA, Vanessa de Arruda; ROBERTI, Débora Regina. Estimativas de produtividade primária bruta (GPP) utilizando imagens Landsat e o modelo geeSEBAL. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE**

SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. Anais [...]. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/267133/001177860.pdf?sequence=1>.

ALMEIDA, C. A. et al. Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa BiomasBR e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass. **Cadernos de Astronomia**, v. 6, n. 1, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astronomia/article/view/47411>.

ANDRADE, Daniela da Silva et al. Evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência no uso de água de uvas viníferas cultivadas no Agreste Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 03, p. 1263–1277, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbqfe/article/view/234340>

BEZERRA, Hélio Nogueira et al. Estimativa da evapotranspiração real diária no semiárido brasileiro utilizando sensoriamento remoto. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 17, n. 47, 2021. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/rts/article/view/12633>

BEZERRA, Joelma M. **Estimativa da evapotranspiração real para área de Caatinga utilizando SEBAL**. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <http://ww3.pgea.ufrpe.br/sites/ww3.pgea.ufrpe.br/files/documentos/joelbezerra.pdf>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de Precisão**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cartas-de-servico/desenvolvimento-agropecuário-cooperativismo-e-associativismo-rural/agricultura-de-precisao>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Caatinga**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/caatinga>

COSTA, L. M.; SCALA JR., N. A Caatinga como sumidouro de carbono: análise de fluorescência da clorofila e precipitação. *Science of the Total Environment*, v. 897, p. 164321, 2024. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2025/08/estudo-revela-importancia-da-caatinga-para-o-sequestro-do-carbono.shtml>

EMBRAPA. **Bioma Caatinga**. Agência de Informação Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga>

FERREIRA, R. R.; MUTTI, P.; MENDES, K. R.; OLIVEIRA, G.; SANTOS, M. A.; SILVA, B. M.; SOUZA, C. M. An assessment of the MOD17A2 gross primary production product in the Caatinga biome, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 2, p. 456–475, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2020.1826063>.

FERNANDES, Moabe Ferreira; QUEIROZ, Luciano Paganucci de. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 70, n. 4, p. 45–54, out./dez. 2018.

FONSECA, N. Umbuzeiro (*Spondia tuberosa*, Arr. Câm) de frutos gigantes. **Agrosoft Brasil**, 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/873958>

FREITAS, R. M. de et al. Sensitivity of vegetation indices to seasonal and interannual variations of vegetation cover in the Caatinga biome. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, p. 111301, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425719303931>

GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano et al. Relation of leaf water content with real evapotranspiration and biomass in Caatinga biome, using remote sensing data. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, p. 1545–1551, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbqfe/article/view/234340>

G1. Pernambuco reduz desmatamento na Caatinga, mas ainda devasta área equivalente a 16 mil campos de futebol, diz estudo. **G1**, 30 maio 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2024/05/30/pernambuco-reduz-desmatamento-na-caatinga-mas-ainda-devasta-area-equivalente-a-16-mil-campos-de-futebol-diz-estudo.ghtml>

Han, Y.X.; Tang, R.; Liao, Z.; Zhai, B.; Fan, J. **A Novel Hybrid GOA-XGB Model for Estimating Wheat Aboveground Biomass Using UAV-Based Multispectral Vegetation Indices**. *Remote Sensing* 2022, 14, 3506.

IBGE. **Semiárido brasileiro: delimitação 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/quadrogeografico/>

INDEX DATABASE. Simple Ratio Red/Green (Red-Green Ratio). 2023. Disponível em: <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=213>.

KIILL, L. H. P. et al. **Preservação e uso da Caatinga**. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**; Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2007. 36 p. (ABC da Agricultura Familiar, 16). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/122743/1/00081410.pdf>

KIILL, L. H. P. **Flora da Caatinga**. Embrapa Semiárido, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/flora>.

LIMA, F. A. de et al. Impactos ambientais do desmatamento na Caatinga. **Revista Ciência Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 88–95, 2022.

MACEDO, F. L. de et al. Determinação da evapotranspiração real diária em diferentes usos e ocupação do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 9, n. 5, p. 1404–1415, 2016.

MACEDO, F. L. de et al. Determinação da evapotranspiração real diária em diferentes usos e ocupação do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 9, n. 5, p. 1529–1542, set. 2016.

MOURA, M. S. B. et al. Emissões de gases do efeito estufa do solo em sistema de produção de caprinos no semiárido brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, e72371, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/mBb89hkDTjXh9tHdwGJHPsn/>.

MAPBIOMAS. **Caatinga perde 160 mil ha de superfície de água e mais de 10 % de vegetação nativa nos últimos 37 anos**. 6 out.2022. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2022/10/06/caatinga-perde-160-mil-ha-de-superficie-de-aqua-e-mais-de-10-de-vegetacao-nativa-nos-ultimos-37-anos/>

NEALE, Christopher M. U.; GONÇALVES, Ivo Zution; MAGUIRE, Mitchell S. Sensoriamento remoto na agricultura irrigada. In: **Agricultura irrigada no Brasil: ciência e tecnologia**. Piracicaba: **ESALQ**, 2022.

NOVO, E. M. L. M. et al. Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 185–194, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/nHT843HzHKybNQQNJjcFLs/>.

OLIVEIRA, Dênia Santos de. **Análise do impacto da evapotranspiração na modelagem hidrológica em regiões semiáridas e úmidas**. 2023. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – **Universidade Federal de Pernambuco**, Caruaru, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/54819>

OLIVEIRA, M.B.L. de et al. **Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro**. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2006. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/159429/trocas-de-energia-e-fluxo-de-carbono-entre-a-vegetacao-de-caatinga-e-atmosfera-no-nordeste-brasileiro>

OLIVEIRA, Rafael Souto Maior de et al. Estrutura da vegetação lenhosa e estoques de carbono em áreas com diferentes históricos de uso no bioma Caatinga. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 52, n. 4, p. 325–333, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/nHT843HzHKybNQQNJjcFLs/>

QI, J., Chehbouni, A., Huete, A., Kerr, Y., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, 48(2), 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)

RODRIGUES, Bruno. **A importância do bioma Caatinga para o semiárido nordestino**. **Jornal da Ciência**, 2020. Disponível em: <https://www.jornaldaciencia.org.br>

ROCHA, Humberto Ribeiro da; RUHOFF, Anderson Luis; ROBERTI, Débora Regina; ARAGÃO, Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de. Estimativa de evapotranspiração por

sensoriamento remoto para gestão de recursos hídricos no Brasil. In: SOBRINHO, Teodorico Alves (Org.). **Regulação e gestão de recursos hídricos no Brasil**. Campo Grande: Oeste, 2023. p. 340–368. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/275010>.

SILVA, K. K. da; BRAGA, C. C.; SILVA, M. T.; COSTA, W. L. de B. *Produtividade primária bruta em uma área de Caatinga em Campina Grande-PB*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. Anais [...]. Santos: INPE, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/11470>

SILVA, A.M.da; SOUSA, F.A.S. de; MEDEIROS, J.F. de. **Evaporação em reservatórios: importância e métodos de estimativa**. Campina Grande: Embrapa Semiárido, 2005. 32 p. (Embrapa Semiárido. Circular Técnica, 1515)

SILVA, Karlla Karem da. **Análise de padrões meteorológicos em regiões semiáridas**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/11470/KARLLA%20KAREM%20DA%20SILVA%20-%20DISSERTA%20c3%87%c3%83O%20%28PPG%20Met%29%202019.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

SANTOS, C.A.C. dos et al. Mudança de Longo Prazo e Regionalização da Evapotranspiração de Referência no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/DswtTWGM9MmmB8m6h5L7V7c/>

SOARES, M. P. et al. Uso sustentável dos recursos da Caatinga. **Revista Verde**, v. 10, n. 1, p. 123–132, 2015.

SILVA, F. B.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M. M.; SILVA, V. P. R. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 61–72, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/3VnCc9pT9rcmCYWXzxFYMzq/>.

SANTOS, Edivan Silva dos; SILVA, Bernardo Barbosa da. **Determinação da produtividade primária bruta na região Nordeste do Brasil com base em dados meteorológicos e satelitários do Google Earth Engine**. Anais do Congresso de Iniciação Científica, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Campina Grande, v. 20, n. 1, 2023. Disponível em: <https://revistas.editora.ufcg.edu.br/index.php/cicufcg/article/view/3167>.

TABARELLI, Marcelo et al. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 70, n. 4, p. 25–29, out./dez. 2018. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252018000400009

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Caatinga: Um bioma brasileiro**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 1982. 160 p.

VALENTE, F.; PAÇO, T. A.; FERREIRA, M. I. Medição da evapotranspiração de um coberto vegetal por métodos micrometeorológicos: o método das flutuações instantâneas. **Anais do Instituto Superior de Agronomia**, v. 50, p. 135–160, 2024. Disponível em: https://repositorio.ulisboa.pt/bitstream/10400.5/96422/3/6_Valente%20F.%20et%20al%2C%20Anais%20do%20Instituto%20Superior%20de%20Agronomia%2C%202024%2C%20v.50%2C%20p.135-160.pdf.pdf

ZENG, Qianghao et al. Comparing the performance of vegetation indices for improving urban vegetation GPP estimation via eddy covariance flux data and Landsat 5/7 data. **Ecological Informatics**, v. 86, 100323, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.100323>