

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Any Caroline Nunes da Silva

**Estudo sobre os padrões do balanço de energia e
carbono em uma área de Caatinga regenerada**

Campina Grande, Março de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – UACA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA - PPGMET

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO SOBRE OS PADRÕES DO BALANÇO DE ENERGIA E
CARBONO EM UMA ÁREA DE CAATINGA REGENERADA**

ANY CAROLINE NUNES DA SILVA

Campina Grande – PB

Março - 2024

ANY CAROLINE NUNES DA SILVA

**ESTUDO SOBRE OS PADRÕES DO BALANÇO DE ENERGIA E
CARBONO EM UMA ÁREA DE CAATINGA REGENERADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos

Coorientador(a): Prof(a). Dra. Keila Rego Mendes

Área de Concentração: Agrometeorologia

Campina Grande – PB

Março - 2024

S586e

Silva, Any Caroline Nunes da.

Estudo sobre os padrões do balanço de energia e carbono em uma área de caatinga regenerada / Any Caroline Nunes da Silva. – Campina Grande, 2024.

60 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos, Profa. Dra. Keila Rego Mendes".

Referências.

1. Agrometeorologia. 2. Desertificação. 3. Meteorologia. I. Santos, Carlos Antonio Costa dos. II. Mendes, Keila Rego. III. Título.


CDU 631:551.5(043)

ANY CAROLINE NUNES DA SILVA


ESTUDO SOBRE OS PADRÕES DO BALANÇO DE ENERGIA E CARBONO EM
UMA ÁREA DE CAATINGA REGENERADA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 01/03/2024


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS**
Data: 05/03/2024 07:50:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade
Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 **KEILA REGO MENDES**
Data: 07/03/2024 10:10:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. KEILA RÊGO MENDES
Programa de Pós-graduação em Ciências Climática
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Documento assinado digitalmente
 **BERNARDO BARBOSA DA SILVA**
Data: 04/03/2024 15:16:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade
Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL BRITO COSTA**
Data: 08/03/2024 11:19:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GABRIEL BRITO COSTA
Instituto de Biodiversidade e Florestas
Universidade Federal do Oeste do Pará

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família, pois é graças ao esforço e apoio de todos que hoje posso me dedicar aos meus estudos e usufruir os frutos colhidos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida e por ter me dado forças e ajudado a ultrapassar todos os obstáculos.

Ao meu pai Marcelo Silva que sempre colocou a minha educação em primeiro lugar e que se eu cheguei até aqui, ele tem grande parcela de contribuição. A minha mãe, Jaciara Barbosa, que sempre acreditou no meu potencial e me apoiou em todos os momentos dessa jornada.

A minha avó materna, da qual eu chamo carinhosamente de “MÃE”, Jaqueline Silva, que sempre fez de tudo por mim e me criou com muito carinho e amor, se fazendo presente em todos os momentos da minha vida.

Agradeço ao meu avô paterno José Carlos e aos meus avós maternos Maria das Graças e Cosme Soares que são minha fortaleza e se orgulham de mim e de toda a minha trajetória.

Agradeço também as minhas tias Mayara Karla e Jaciane Barbosa que sempre se fazem presentes na minha vida e estão sempre torcendo, agradecendo e me apoiando a alcançar todos os meus objetivos.

Ao meu “namorado” Brenno Nóbrega, por me apoiar incansavelmente, mesmo nos momentos que até eu cheguei a desacreditar. Me deu forças para continuar! Obrigada por todo carinho, apoio, dedicação e motivação.

A minha sobrinha “Maria Lara” por ter me proporcionado tantos momentos para sorrir nesse período e ao meu afilhado Fabrício Gabriel por se fazer presente e está sempre orgulhoso pelas minhas conquistas.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Antônio por ter aceitado meu convite de orientação e por todos os ensinamentos passados, tanto nas aulas como no processo para obtenção do título.

Também agradeço à minha coorientadora a Prof(a). Dra. Keila Rego Mendes por todo apoio, incentivo, disposição, paciência e ensinamentos para que esse trabalho fosse executado da melhor maneira possível.

Ainda agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGMet) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Vocês foram essenciais para todo o meu progresso e aprendizado nessa fase.

Por último, mas não menos importante, agradeço à secretária do PPGMet, Arilene, por toda disposição e paciência em todo esse período de permanência na UFCG. Você é uma excelente profissional!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – localização da torre micrometeorológica utilizada. Fonte: elaborada pela autora (2023).....	26
Figura 2 – Normal climatológica de Campina Grande para a precipitação, umidade relativa e temperatura do ar.....	37
Figura 3 – temperatura do ar para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: elaborada pela autora (2024).....	38
Figura 4 – umidade relativa do ar para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: elaborada pela autora (2024).....	38
Figura 5 - radiação global para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: elaborada pela autora (2024).....	39
Figura 6 - precipitação acumulada mensal para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: elaborada pela autora (2024).....	40
Figura 7 – Índice de área foliar (Leaf area index, LAI), índice de Vegetação Aprimorado (EVI) acumulado de precipitação mensal para os anos de 2014 e 2016 na área do estudo. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	41
Figura 8 – Fluxo de calor sensível (H) para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	42
Figura 9 – fluxo de calor latente (LE) para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	43
Figura 10 - Comportamento do GPP para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	44
Figura 11 - Comportamento do NEE para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	45
Figura 12 - Comportamento do Reco para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	46
Figura 13 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do fluxo de calor sensível (H). Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	47
Figura 14 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do fluxo de calor latente (LE). Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....	48
Figura 15 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot	

(verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do GPP. Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....50

Figura 16 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do NEE. Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3. Fonte: Elaborada pela autora (2024).....51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Instrumentos e variáveis medidas na torre de fluxo e suas frequências de amostragem e armazenamento. Fonte: elaborada pela autora (2024).....	27
Tabela 2 - Parâmetros utilizados para a simulação do modelo SITE. Fonte: Adaptado de Mendes et al. (2021).....	32
Tabela 3 - Parâmetros que serão calibrados: Área foliar específica (sla , m^2 folha kg^{-1} C), dimensão típica das folhas (du , m), dimensão típica das hastes (ds , m), largura da folha (w , m), coeficiente de condutância estomática (m , adimensional), capacidade máxima da enzima Rubisco (V_{max} , $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$) e fração inicial de umidade do solo (θ_g/θ_d , adimensional). Onde θ_g é o teor de água do solo com base na massa expressa no teor de umidade do solo gravimétrico, θ_d é a umidade do solo. Fonte: Adaptado de Mendes et al. (2021).....	33
Tabela 4 – valores de r e os possíveis resultados de interpretação. Fonte: Sousa, Áurea (2019).....	35
Tabela 5 – Correlação entre a variáveis da vegetação e variáveis meteorológicas. Fonte: elaborada pela autora (2024).....	51
Tabela 6 - Correlação entre o observado e os simulados com e sem calibração das variáveis H e LE . Fonte: elaborada pela autora (2024).....	52
Tabela 7 - Análise dos erros dos dados observados com as simulações calibradas e não calibradas para o H . Fonte: elaborada pela autora (2024).....	52
Tabela 8 - Análise dos erros dos dados observados com as simulação calibradas e não calibradas para o LE . Fonte: elaborada pela autora.....	53
Tabela 9 - Correlação entre o observado e os simulados com e sem calibração para o GPP . Fonte: elaborada pela autora (2024).....	53
Tabela 10 - Análise dos erros dos dados observados com as simulações calibradas e não calibradas para o GPP . Fonte: elaborada pela autora (2024).....	54
Tabela 11 - Correlação entre o observado e os simulados com e sem calibração para o NEE . Fonte: elaborada pela autora (2024).....	54
Tabela 12 - Análise dos erros dos dados observados com as simulações calibradas e não calibradas para o NEE . Fonte: elaborada pela autora (2024).....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO₂	-	Carbono
EC	-	Eddy Covariance
EVI	-	Índice de Vegetação Melhorado
ET	-	Evapotranspiração
F_c	-	Fluxo de Carbono
G	-	Fluxo de calor no solo
GPP	-	Produtividade Primária Bruta
H	-	Fluxo de calor sensível
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
INSA	-	Instituto Nacional do Semiárido
LE	-	Fluxo de calor latente
LAI	-	Índice de área foliar
MAE	-	Erro médio absoluto
ME	-	Erro médio
NDVI	-	Índice de vegetação da diferença normalizada
NEB	-	Nordeste Brasileiro
NEE	-	Troca líquida de CO ₂ pelo ecossistema
NPP	-	Produtividade primária líquida
Reco	-	Respiração do ecossistema
RMSE	-	Erro quadrático médio
R_n	-	Saldo de radiação
SITE	-	Simple Tropical Ecosystem Model
T_{ar}	-	Temperatura do ar
T_{solo}	-	Temperatura do solo
Ur	-	Umidade relativa do ar

VPD - Déficit de pressão de vapor

RESUMO

A Caatinga é uma vegetação muito suscetível ao processo de degradação, que poderá evoluir para a desertificação. Por isso compreender e simular a dinâmica em uma determinada área que conta com presença desse bioma e que conseguiu se recuperar após um processo de degradação é de grande importância. Nesse contexto, este trabalho busca estudar as variáveis meteorológicas, as componentes de balanço de energia e carbono em ambiente de Caatinga regenerada, utilizando a técnica da covariância dos vórtices turbulentos e modelo biofísicos de transferência solo-vegetação-atmosfera (SVAT) como ferramenta alternativa para simular os componentes de CO₂ (produção primária bruta, GPP; respiração do ecossistema, Reco; e da troca líquida de CO₂ do ecossistema, NEE) e balanço de energia, para isso, utilizou-se os anos de 2014 e 2016. Inicialmente, realizou-se um estudo das variáveis meteorológicas: temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação, por meio da estação automática do INMET. Para o estudo do balanço de energia e carbono foram utilizados os dados de uma torre micrometeorológica, localizada no município de Campina Grande, na Paraíba. Os resultados mostraram que a dinâmica dos componentes dos fluxos de CO₂ variou dependendo da magnitude e distribuição das chuvas e, conseqüentemente, da variabilidade da cobertura vegetal. Mesmo durante a estação seca, a Caatinga atuou como sumidouro de carbono atmosférico durante os anos estudados. O GPP no ano de 2016 apresentou valores menores quando comparados com o do ano de 2014, visto que variaram de 0,1 a 0,3 gCm²h⁻¹. O H no ano de 2014 apresentou valor máximo em torno de 40 W/m² e o valor mínimo chegou a 30 W/m² (julho), em 2016 os maiores valores foram em torno dos 35 W/m². Ambos os anos mostraram valores maiores de H no período seco. Enquanto isso, o LE mostrou que os maiores valores variaram de 60 a 100 W/m² em 2014 e de 40 a 60 W/m² em 2016. Nos dois anos esses valores foram encontrados no período em que teve maiores precipitações, devido à maior disponibilidade de água. Para a modelagem, foi utilizado o ano de 2014 e, com isso, o modelo conseguiu simular de maneira satisfatória o H, LE, GPP e NEE. Além disso, de maneira geral, conseguiu capturar a sazonalidade do LE e os valores, principalmente da estação seca. O mesmo ocorreu com o H, no qual conseguiu captar a partição de energia disponível após a calibração. O modelo também conseguiu captar os valores do GPP e NEE após a calibração. Desse modo, é importante que leve em consideração alterações na vegetação.

Palavras-Chave: Desertificação; Semiárido; Modelagem; Solo-vegetação-atmosfera.

ABSTRACT

The Caatinga is a vegetation that is very susceptible to the degradation process, which could evolve into desertification, which is why understanding and simulating the dynamics in a given area that has the presence of this biome and which has undergone a degradation process, causing a loss in productivity, but which has managed to recover is of great importance. In this context, this work seeks to study the meteorological variables, the energy and carbon balance components in a regenerated Caatinga environment, using the turbulent vortex covariance technique and the biophysical soil-vegetation-atmosphere transfer model (SVAT) as an alternative tool to simulate the CO₂ components (gross primary production, GPP; ecosystem respiration, Reco; and net ecosystem CO₂ exchange, NEE) and energy balance, for which the years 2014 and 2016 were used. Initially, a study of meteorological variables was carried out: air temperature, relative humidity and rainfall, using INMET automatic station. Data from a micrometeorological tower located in the municipality of Campina Grande, Paraíba, was used to study the energy and carbon balance. The results showed that the dynamics of the CO₂ flux components varied depending on the magnitude and distribution of rainfall and, consequently, the variability of vegetation cover. Even during the dry season, NEE was in balance and the Caatinga acted as an atmospheric carbon sink during the years studied. The GPP in 2016 was lower than in 2014, as it ranged from 0.1 to 0.3 gCm²h⁻¹. H in 2014 had a maximum value of around 40 W/m² and a minimum value of 30 W/m² (July), while in 2016 the highest values were around 35 W/m². Both years showed higher H values in the dry season. Meanwhile, LE showed that the highest values ranged from 60 to 100 W/m² in 2014 and from 40 to 60 W/m² in 2016. In both years, these values were found in the period with the highest rainfall, due to the greater availability of water. For the modeling, the year 2014 was used and, with this, the model was able to satisfactorily simulate H, LE, GPP and NEE. In addition, in general, it managed to capture the seasonality of LE and the values, especially in the dry season. The same occurred with H, where it managed to capture the partitioning of available energy after calibration. The model was also able to capture GPP and NEE values after calibration. It is therefore important to take vegetation changes into account.

Keywords: Desertification; Semi-arid; Modeling; Soil-vegetation-atmosphere.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1 BIOMA CAATINGA.....	20
3.2 DESERTIFICAÇÃO E REGENERAÇÃO DA VEGETAÇÃO.....	21
3.3 BALANÇO DE ENERGIA E CARBONO.....	23
3.4 MODELAGEM.....	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	26
4.2 DADOS.....	27
4.3 TRATAMENTO DOS DADOS OBSERVADOS.....	28
4.3.1 Balanço de energia.....	28
4.3.2 Processamento de dados.....	29
4.3.3 Controle de qualidade de detecção de spikes.....	30
4.3.4 Balanço de carbono.....	31
4.4 MODELO.....	32
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	34
4.5.1 Coeficiente de correlação.....	36
4.5.2 Análise dos erros.....	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 CLIMATOLOGIA DE CAMPINA GRANDE.....	37
5.2 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS.....	38
5.3 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	40
5.4 BALANÇO DE ENERGIA.....	41

5.5 BALANÇO DE CARBONO.....	43
5.6 COMPARAÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E SIMULADOS.....	46
5.6.1 Balanço de energia – Simulações.....	46
5.6.2 Balanço de carbono – Simulações.....	49
5.7 TESTES DE CALIBRAÇÃO.....	51
6. CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas presentes na terra são de grande relevância para entender o funcionamento das trocas de calor e massa entre a superfície e a atmosfera (FONSECA *et al.*, 2018). O tipo de vegetação que predomina no Nordeste Brasileiro (NEB) é chamado de Caatinga. Essa vegetação ocupa todos os estados da NEB, com exceção do Maranhão, e o norte de Minas Gerais (FERNANDES e QUEIROZ, 2018) e apresenta sistema de chuvas irregulares (PRADO, 2003). Trata-se de uma vegetação caracterizada por ter poucas folhas, apresentar espinhos, além de alta adaptabilidade ao clima semiárido. A causa principal dessa perda de folhas é a escassez de água na região, reduzindo assim a evapotranspiração (RODRIGUES *et al.*, 2020). De acordo com o MapBiomias, a Caatinga nos últimos anos, vem se apresentando cada vez mais seca, além de acreditar que entre as principais causas para a mudança na cobertura do solo está sendo agravado pelo processo de degradação das terras, que poderá levar à desertificação, devido principalmente, a retirada da vegetação é a atividade agropecuária.

Entre os processos que podem ocorrer na vegetação da Caatinga, está a desertificação, podendo ser definida como um processo mudança no solo apresentando perda progressiva de produtividade, devido a utilização desenfreada ou inadequada. Segundo Chaves *et al.* (2015), a desertificação está inserida no processo de degradação das terras inseridas em ambiente considerado naturalmente árido, semiárido e subúmido, sendo em muitos casos relacionado a intensificação dos efeitos causados pela falta das chuvas. Além disso, o homem também interfere nessa transformação considerada de larga escala nos ecossistemas da Caatinga, o que acaba dificultando a capacidade dessa vegetação de oferecer benefícios a população (TABARELLI *et al.*, 2017).

A regeneração é a capacidade que se tem de se recompor após sofrer com processos químicos, físicos ou biológicos consideráveis. No bioma Caatinga, as áreas degradadas podem sofrer esse processo, caso esses locais sejam mantidos sem nenhuma intervenção por um longo período (WALKER *et al.*, 2011; BARROS, 2018). Além disso, nessas áreas a vegetação pode ter respostas diferentes, no qual as árvores podem apresentar menos biomassa, e conseqüentemente, apresentam menos ramificações e são mais frágeis (SAMPAIO *et al.*, 2010). Por isso, entender como fica a atmosfera após a recuperação da vegetação é de grande relevância.

A evapotranspiração (ET) também é um processo de grande relevância para a atmosfera e a vegetação, sendo caracterizada pela integração da mudança de água presente no solo e na planta para a atmosfera por meio do processo de evaporação e transpiração, respectivamente.

Além disso, a evapotranspiração pode ser afetada por condições meteorológicas, assim como as características ambientais presentes (PANDEY *et al.*, 2016). Também é importante entender e estimar as fontes que são responsáveis pela evapotranspiração para ter um melhor gerenciamento do local com a vegetação presente (SENAY *et al.*, 2016).

O balanço de energia está relacionado à contabilização dos fluxos existentes devido a transformação de energia na camada limite planetária, no qual são importantes para avaliação e quantificação das trocas que existem entre o solo e a vegetação (FONTANA, BERLATO e BERGAMASCHI, 1991). Sendo assim, o estudo do balanço de energia de uma superfície vegetada e a atmosfera é importante para caracterizar o microclima local, identificar interações entre variáveis ambientais e a vegetação, e quantificar os efeitos das atividades antropogênicas (BIUDES *et al.*, 2009). É notório que a degradação esteja aumentando nos últimos anos, seja globalmente ou local, além de causar diversos efeitos sobre a região afetada (PEREIRA *et al.*, 2022). É importante salientar que o fato de a Caatinga não ser uma vegetação uniforme, influencia nos componentes do balanço de energia (FERNANDES *et al.*, 2019).

Assim como o balanço de energia, o balanço de carbono são fluxos que envolvem a transformação, porém nesse caso sendo devido ao conteúdo de carbono (CERRI *et al.*, 2007). Esse balanço está ligado ao efeito estufa, visto que o carbono é um dos principais causadores desse processo (NOBRE e NOBRE, 2002), por isso é tão importante o estudo desse balanço em diferentes regiões. Segundo Giongo (2011), o estudo sobre esse balanço em áreas de Caatinga é de suma importância, pois sem eles não teria como compreender sobre a influência da antropização, visto que acaba impactando no sistema produtivo, e de como ter medidas de adaptação a partir disso.

A partir disso, compreender e simular variáveis a partir de dados meteorológicos, fluxos de energia e de carbono em uma determinada área que conta com presença de caatinga que passou pelo processo de degradação e conseguiu se recuperar por meio de métodos de modelagem da interface solo-vegetação-atmosfera é de grande relevância, visto que com isso aumenta a possibilidade de saber lidar com o problema de áreas que sofrem com processos de desmatamentos, uma vez que são áreas que estão ligadas diretamente ou indiretamente com a produção de alimentos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é estudar as componentes do balanço de energia e carbono em uma área com presença de Caatinga regenerada no estado da Paraíba, bem como utilizar modelo biofísico de transferência solo-vegetação- atmosfera (SVAT) como uma ferramenta alternativa para simular os componentes de balanço de energia e CO₂.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o balanço de energia utilizando dados observados provenientes de uma torre de fluxo;
- Quantificar e avaliar os padrões sazonais das trocas de CO₂;
- Avaliar a condição de fonte ou sumidouro de CO₂;
- Avaliar o desempenho do *Simple Tropical Ecosystem Model* (SITE), por meio de métricas estatísticas em região com presença de Caatinga regenerada.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 BIOMA CAATINGA

A falta de informação sobre locais que têm presença de vegetação ainda é problema para a sociedade, principalmente no que diz respeito ao bioma Caatinga, que é de grande relevância. Com isso, Gomes *et al.* (2021) estudaram mais profundamente sobre essa vegetação e verificaram se a variação sazonal entre as estações secas e chuvosa, em duas áreas distintas de Caatinga, ambas na cidade de São José de Piranhas (PB), ocasionava a alguma intervenção no que diz respeito ao carbono e se com isso tinha alguma alteração na temperatura de superfície nas áreas estudadas por meio de dados de sensores, sendo eles: o OLI e o TIRS do satélite Landsat 8. A partir disso, os autores analisaram que a precipitação é uma importante variável na influência da fenologia da vegetação. Além disso, conseguiram identificar que tanto a temperatura como o fluxo de carbono sofrem influência devido a sazonalidade, no qual na época de seca ocorreu uma menor retirada de carbono e temperaturas mais elevadas, enquanto na estação chuvosa, foi encontrado o comportamento contrário. De Jesus *et al.* (2021) também analisaram o comportamento da Caatinga de dois tipos, aberta e densa, com a influência das chuvas, em uma área de estudo de conservação no estado de Sergipe, no qual os dados de precipitação foram entre os anos de 2000 a 2018. Com isso, os autores notaram que a vegetação densa, apresentou NDVI e cobertura foliar maior em todo o período, além de observarem que a densa consegue ter a atividade fisiológica por mais tempo, ou seja, conseguem diminuir os efeitos causados pela desertificação. Além disso, concluíram que em área de Caatinga aberta, a vegetação tem menor capacidade de fotossíntese, devido está mais exposta aos efeitos causados pelas variações das condições climáticas, além de ter a capacidade de regeneração natural do solo reduzida.

Um dos grandes processos que envolvem a vegetação é o sequestro de carbono, principalmente em área de Caatinga que a vegetação é sumidouro de gás carbônico da atmosfera, nesse sentido Moraes *et al.* (2017) avaliaram esse processo em áreas de caatinga no município de Petrolina (PE) por meio de produtos do sensor MODIS a bordo do satélite Terra. Com isso encontraram que ocorre um maior sequestro de carbono no período chuvoso e, principalmente, em áreas que apresentam caatinga preservada, enquanto áreas que apresentaram influência de atividades antrópicas esse sequestro foi menor.

Alguns trabalhos estudaram áreas com presença de Caatinga em diversos locais do Nordeste Brasileiro (NEB). Silva (2019) estimou o desempenho sazonal e anual do balanço de energia em uma área determinada que apresenta Caatinga preservada, no Semiárido Brasileiro

durante um período de seca. Por outro lado, De Oliveira *et al.* (2021) deram preferência ao estudo de duas áreas distintas, uma com presença de Caatinga densa e outra com Caatinga esparsa, as duas apresentaram comportamento dos parâmetros físicos semelhantes, incluindo a absorção de carbono, no qual as duas áreas se comportaram como sumidouros de carbono, porém a área de Caatinga esparsa mostrou uma menor capacidade de absorver carbono quando comparada a outra área. Além disso, os autores encontraram que em áreas que apresentam desmatamento acaba influenciando na capacidade de diminuir os efeitos causados pelo aumento dos gases do efeito estufa na atmosfera.

A Caatinga é uma das vegetações que tem poder de regeneração, por isso alguns estudos focaram em áreas que têm essa vegetação em regeneração, com isso Souza *et al.* (2016) realizaram um estudo em Cariris Velhos – PB, região atingida pelo desmatamento, no qual identificaram como o processo de regeneração afeta na temperatura do solo, com isso notaram que existe um aumento da temperatura do solo à medida que acontece a degradação no solo, além de mostrar uma necessidade de evitar o aumento dessas áreas e que exista a criação de medidas para recuperar esses solos. No estudo de Sampaio *et al.* (1998) acompanharam alguns efeitos do corte da vegetação, em locais com ou sem queima posterior a esse corte em local de Caatinga em Pernambuco. Apresentaram resultados significativos que indicam que grande parte das plantas da Caatinga rebrota após o corte, entretanto caso haja queima depois do corte esse renascimento diminui de forma progressiva.

Vale salientar que uma das principais variáveis meteorológicas que influenciam na cobertura vegetal de uma região é a precipitação, a partir disso Nascimento *et al.* (2020) escolheu uma área que presença de caatinga dentro de uma Núcleo de desertificação para fazer avaliação de como a precipitação influencia no uso e ocupação deste solo, com auxílio de dados observados, imagens provenientes dos satélites Landsat 5 e 8 e avaliação estatísticas, a partir disso conseguiram identificar que o sensoriamento remoto tem a capacidade de avaliar o nível da regeneração da vegetação e associar a fatores que tem ligação com a vegetação. A partir disso, detectaram que as variáveis meteorológicas, como a temperatura do ar e a precipitação são as que mais influenciam na cobertura vegetal em um solo exposto.

3.2 DESERTIFICAÇÃO E REGENERAÇÃO DA VEGETAÇÃO

Um dos principais desafios da Caatinga é passar pelo processo de degradação dessa vegetação nativa. Segundo Alves *et al.* (2009) entre os principais fatores para esse processo está o fator do aumento das atividades econômicas, pois, conseqüentemente, influencia no aumento do desmatamento, que por sua vez, já é um tipo de vegetação fragilidade, devido às dificuldades

de sua região relacionadas, principalmente, aos recursos hídricos, causando diversos problemas para a região. Rodrigues *et al.* (2019) analisaram os impactos das mudanças climáticas em uma área determinada, para entender como se comporta o clima da região NEB, através de modelo acoplado, no qual compara dois cenários possíveis, um com a substituição de toda área de Caatinga e outra para entender o impacto da desertificação no local. Para melhor entender essa temática, foi utilizado o modelo CCM3-IBIS, no qual foram realizadas duas simulações, no qual utilizava o período entre os anos de 2000 a 2049, uma com a vegetação que existiria se não tivesse intervenção humana e outra caso ocorresse intervenção e Caatinga fosse substituída por deserto. Com isso, os autores encontraram resultados satisfatórios que mostraram que o processo de desertificação realiza alterações significativas no clima do NEB, no qual áreas que são retiradas a cobertura vegetal, diminui a precipitação e evapotranspiração e aumenta a temperatura do ar e o escoamento superficial.

Existem grandes áreas de desertificação localizadas no NEB. Com isso, De Souza *et al.* (2012) utilizaram outra abordagem, com ênfase no estudo do albedo da vegetação presente, no qual o analisaram também em uma região que apresentava Caatinga degradada em um período chuvoso em uma cidade de Pernambuco. Essas análises foram realizadas através da relação entre os dados de radiação refletida e incidente. Através disso encontraram um albedo médio da Caatinga degradada durante o período chuvoso em torno de 16%. Em outro estudo também realizado em Pernambuco, porém na cidade de Itacuruba, Barbosa Neto *et al.* (2015) realizaram mapeamento do uso da terra com auxílio de imagens de satélite, no qual encontraram na área presença de degradação com processos de erosão considerados de moderados a forte, tendo como principal evidência a diminuição da cobertura vegetal da região.

O processo de regeneração natural é conhecido como um importante tipo de desenvolvimento da vegetação, no qual consegue se restabelecer em uma área que passou por um processo de degradação/antropização sem auxílio da intervenção humana. Apesar de ser um tema de grande relevância, ainda é pouco estudado no meio acadêmico, por isso Pires *et al.* (2017) resolveram avaliar fluxos de radiação e energia, CO₂ e evapotranspiração em área de caatinga degradada, localizada em Araripina, PE, para o ano de 2013, a partir de dados micrometeorológicos. Por meio dessa análise, os autores observaram que as trocas existentes que envolvem o solo, vegetação e atmosfera fazem com que a absorção do carbono em uma área degradada que se encontra em processo de regeneração seja muito dependente de fatores meteorológicos, sendo o principal deles a precipitação e temperatura do ar, além da temperatura do solo.

3.3 BALANÇO DE ENERGIA E CARBONO

Alguns estudos dão ênfase aos balanços de energia. Com isso Borges *et al.* (2020) estudaram esse balanço em duas áreas distintas com presença de Caatinga com auxílio das técnicas de covariância de vórtices (EC). Os autores observaram a partir de seus resultados que a radiação líquida na superfície (R_n) apresentou valores maiores na área de Caatinga esparsa em comparação com a área de Caatinga Densa. Outro fator importante encontrado pelos autores, foram os componentes do balanço de energia, no qual apresentaram as diferenças de valores mais consideráveis no período seco, sendo a maior parte da energia disponível para a superfície correspondeu ao fluxo de calor sensível (H).

Oliveira *et al.* (2006) avaliaram as trocas de energia e de CO_2 existentes entre a superfície e atmosfera em área com presença de Caatinga nativa, para isso os autores escolheram o município de Petrolina, em Pernambuco, através de uma torre micrometeorológica, com variados sensores capazes de serem lidos a cada minuto. Para fim de cálculos, esses dados gerados a partir dos sensores foram processados para realização dos resultados de calor latente, sensível e do dióxido de carbono por meio da técnica da covariância dos vórtices turbulentos. Para o balanço de energia foi estudado o período de julho de 2004 a julho de 2005. Os resultados relacionados ao balanço de energia encontrados pelos autores, mostraram que em regiões consideradas semi áridas a maior parte de energia disponível (R_n) é liberada em forma de calor sensível (H), além disso no período seco de uma região as trocas existentes entre superfície e atmosfera apresentam-se de forma estável. Entretanto, quando se tem uma disponibilidade de água maior, ou seja, com eventos de chuvas intensos observaram que existe um aumento do fluxo de calor latente (LE), devido ao processo de evaporação, visto que tem maior disponibilidade de água no solo. Em relação ao fluxo de CO_2 , os autores observaram que no período seco, o fluxo líquido de CO_2 ficou limitado devido aos fechamentos dos estômatos e apresentou valores positivos, indicando apenas respiração nessa estação.

Entre os processos importantes que envolvem a atmosfera está o balanço de CO_2 , no qual é um importante qualificador de absorção ou emissão de carbono. Tendo em vista essa temática, Mendes *et al.* (2021) utilizaram um modelo de solo-vegetação-atmosfera para representar os comportamentos anuais e sazonais dos fluxos de energia e carbono em uma determinada área com presença de caatinga preservada. O modelo utilizado simulou de maneira satisfatória a produtividade primária bruta (GPP) e a troca líquida de CO_2 do ecossistema (NEE). Utilizando o mesmo modelo do trabalho citado acima o Simple Tropical Ecosystem Model (SITE), Silva *et al.* (2021) avaliaram os componentes simulados dos balanços de energia e de CO_2 em duas cidades distintas, uma inserida em um núcleo de desertificação (Cabrobó-

PE) e outra no entorno de um núcleo (Ibimirim – PE) em dois anos distintos, sendo eles 2009 e 2014. Com isso os autores observaram que o modelo também apresentou valores satisfatórios, além de encontrarem que a sazonalidade referentes às chuvas que ocorrem nas regiões é de grande relevância para que ocorra a modulação dos balanços na vegetação da Caatinga. Outro trabalho que também estudou os fluxos de energia e CO₂ com auxílio do SITE, foi o de Marques (2022), no qual analisaram o comportamento dos balanços de energia e CO₂ no bioma caatinga em dois cenários distintos, um com evento extremo de precipitação e outro com evento de seca extrema. Para isso, além do SITE, utilizou de dados meteorológicos do INMET dos anos de 2009 e 2012, com precipitação extrema e seca extrema, respectivamente. Por meio disso, concluiu que a precipitação é um forte influenciador das trocas de energia e CO₂, a absorção líquida de CO₂ da caatinga durante o ano com chuva é superior quando comparado com o ano de seca extrema.

Silva *et al.* (2017) estimaram os fluxos de CO₂ e de energia na área de caatinga, estado de Pernambuco, no semiárido brasileiro. Para esse estudo utilizaram o método de covariância de vórtices turbulentos. Observaram que o fluxo de calor sensível (H) foi o principal consumidor da energia disponível, além disso também analisaram a evapotranspiração (ET) e notaram comportamentos diferentes que são influenciadas pelas estações, no qual na estação seca a ET foi controlada pela vegetação, pois não tinha disponibilidade de chuvas e apresentou atuação como fonte de carbono na caatinga, enquanto na estação chuvosa foi controlada pelas condições atmosféricas e funcionou como sumidouro de carbono. É importante lembrar que alterações realizadas no solo de áreas vegetadas florestais nativas, consideradas secas, por meio de atividade humana resulta em diminuição de biomassa e carbono (ROSA, 2018).

Dentre alguns fatores importantes para o estudo da vegetação em interação com a atmosfera está a evapotranspiração (ET), importante quantificador para a perda de água que a planta e solo perde por meio da transpiração e evaporação. Dessa maneira, Marques *et al.* (2020) deram ênfase para essa variável, avaliando a variabilidade interanual envolvendo a evapotranspiração em local de Caatinga preservada durante dois anos considerados secos (2014 e 2015) na região do NEB. Os autores observaram que durante os anos do estudo a ET apresentou valores mais baixos na estação seca, como consequência da perda de folhas ou do fechamento dos estômatos. Por outro lado, os maiores valores foram encontrados na estação chuvosa. A partir disso, notaram que a disponibilidade de água presente influencia significativamente na ET na estação chuvosa, enquanto na estação seca foi relativamente controlada pela disponibilidade de energia.

3.4 MODELAGEM

A modelagem tem como objetivo principal estimar/modelar variáveis solicitadas a partir de outras variáveis de entrada. Nesse sentido, Baudena *et al.* (2002) estudaram a interação entre atmosfera, umidade do solo e vegetação em ambientes que consistem em limitação de água. Para isso utilizaram um modelo que utiliza a dinâmica solo-vegetação-atmosfera e é considerado de processos simplificados, no qual é diretamente influenciado pela umidade do solo e a cobertura vegetal. Com isso, os autores encontraram resultados que indicam que a vegetação é controlada pela quantidade de umidade do solo disponível, além de influenciar assim também a atmosfera e o albedo. Além disso, encontraram que as mudanças que podem ocorrer na cobertura vegetal em regiões áridas e semiáridas são relevantes para a ocorrência de diferentes regimes climáticos.

Marques (2022) avaliou o comportamento dos balanços de energia e CO₂ no bioma Caatinga, porém em condições de extrema precipitação, sendo em duas condições (seca - 2009 e intensa - 2012). Para isso utilizou o Simple Tropical Ecosystem Model (SITE). Com isso, os resultados mostraram que a Caatinga se comportou como sumidouro de carbono nos dois períodos estudados, além de notarem que no período de maior precipitação a maior parte do R_n foi convertido em LE, quando comparado com o período mais seco.

Existe uma dificuldade para medição de trocas de energia, devido principalmente, a um elevado custo. A partir disso, Andrade (2009) estudou a aplicabilidade do Simple Tropical Ecosystem Model (SITE) para simular os fluxos de energia em área com presença de floresta de transição no cerrado. Com isso, encontrou que o LE apresentou valores maiores na estação mais úmida da região e o H maior na estação seca. Além disso, notou que o modelo utilizado apresentou melhores resultados para simular os valores diários, o saldo de radiação e uma boa simulação para o LE com uma dificuldade maior para simular o H.

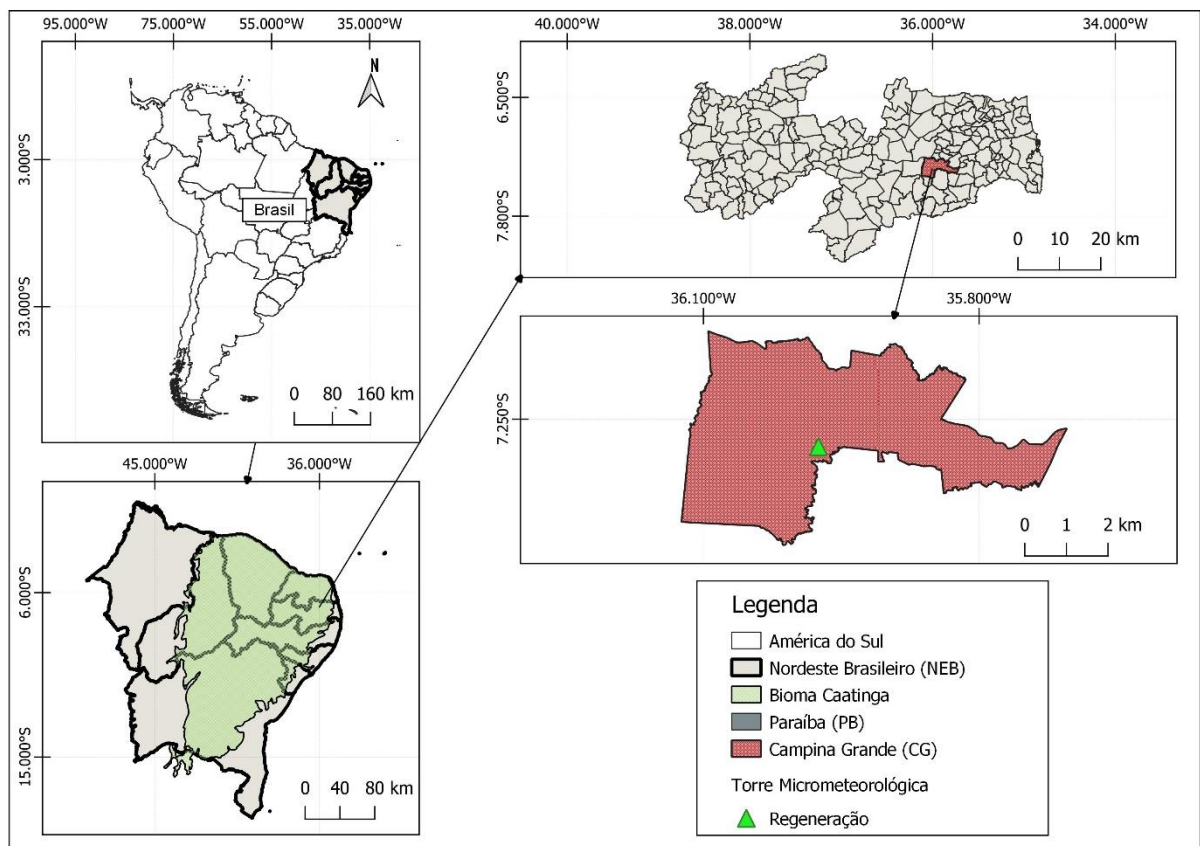
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O bioma Caatinga possui uma área equivalente em torno de 862.818 km², sendo considerado o quarto bioma do país, baseado em sua extensão quando comparado com os outros biomas existentes no país, sendo presente exclusivamente na região Nordeste do Brasil, com exceção de uma pequena parte que existe no estado de Minas Gerais, fazendo limite com outros três biomas brasileiros (AB’SÁBER, 1974; IBGE, 2019;).

O estudo foi realizado com dados de uma torre micrometeorológica (Figura 1), localizada na cidade de Campina Grande, no estado da Paraíba, no semiárido do Brasil. Essa torre é localizada em uma área que apresenta vegetação da Caatinga e faz parte do Instituto Nacional do Semiárido (INSA). Um local compreende a Caatinga em processo de regeneração (7° 27' 99.33" S, 35° 97' 47.81" W), com presença de vegetação densa (DC).

Figura 1 - localização da torre micrometeorológica utilizada.



Fonte: elaborado pela autora (2023)

A cidade de Campina Grande apresenta altitude de 560m e de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) tem uma área territorial de aproximadamente 592 km², com uma população estimada de 413.830 pessoas, analisada em 2021 e conta com uma

densidade demográfica de 648.31 hab/km². No que diz respeito ao clima, é classificada de acordo com a classificação de Koppen com o tipo BSh, sendo um clima considerado seco, semiárido, quente com temperaturas médias em torno de 23 °C, com temperatura mínima variando entre 18 °C a 22 °C e a temperatura máxima de 21 °C a 25 °C.

De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas (AES/A), o acumulado anual de precipitação na cidade de Campina Grande ultrapassa os 700 mm. Para entender sobre essa variável, Dantas *et al.* (2015) realizaram um estudo com o objetivo de analisar os eventos extremos climáticos, no que diz respeito à temperatura do ar e a precipitação, em Campina Grande. Com isso, observaram que as temperaturas mínimas e máximas tiveram aumento, porém de maneira gradual. Além disso, notaram que as chuvas intensas na região, baseado apenas nos índices extremos de precipitação, tem uma tendência de aumento e com uma diminuição entre as ocorrências.

4.2 DADOS

Os dados iniciais existentes na torre micrometeorológica foram os anos de 2013 a 2017, no qual apenas o ano de 2017 apresentava faltantes na maioria do ano. Foram realizados o tratamento de dados para todos os anos, porém o ano de 2015 apresentou muitos dados faltantes. Com isso, foram excluídos deste estudo, inicialmente, esses dois anos. Além disso, o ano de 2013 também passou pelo processo de exclusão, pois como o método principal do estudo é de comparação sazonal, o ano de 2013 apresentou valores muito próximos e uma quantidade maior de dados faltantes do que em 2014. Por isso, pelo método de exclusão foi escolhido os anos de 2014 e 2016 .

O período inicial utilizado para o estudo foram os anos de 2014 e 2016, de 1 de janeiro a 31 de dezembro. Para inserção dos dados iniciais do modelo foi necessário o valor de cada hora do dia, entretanto os dados fornecidos pelas torres são coletados a cada 30 minutos. Por isso foi somado os dados referentes a hora e realizado a média de cada para ser utilizado. Para dados de entrada é necessário ter o ano utilizado, com seu respectivo dia e hora, além de algumas variáveis de entrada, sendo elas: velocidade horizontal do vento (m/s), temperatura (°C), precipitação (mm/h), fluxo solar e infravermelho incidente (W/m²) e a umidade específica do ar (kg H₂O/kg ar). Na Tabela 1 apresentam-se as variáveis coletadas nas torres e que estavam disponíveis, assim como os instrumentos que fizeram a medição e o armazenamento.

Tabela 1 - Instrumentos e variáveis medidas na torre de fluxo e suas frequências de amostragem e armazenamento.

Variáveis	Instrumentos	-	Armazenamento
Temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%)	Sonda de temperatura e umidade relativa – Modelo HM945C – Vaisala, Corporation, Helsink, Finlândia.	5 s	30 min
Fluxo de calor no solo	Placas de fluxo de calor do solo – Modelo HFP01SC – Hukseflux Thermal, Delft, Países Baixos.	5 s	30 min
Radiação líquida (W/m ²)	Radiômetro de rede – CNR4 – Kipp & Zonen BV, Delft, Países Baixos.	5 s	30 min
Temperatura de alta frequência (°C)	Sonda HMP155A - Vaisala Corporation, Helsink, Finlândia.	10 Hz	10 Hz
Pressão atmosférica (hPa)	Barômetro melhorado – Modelo PTB110 – Vaisala Corporation, Helsink, Finlândia.	10 Hz	10 Hz
Componentes escalares tridimensionais da velocidade do vento (m/s) e da temperatura sônica (°C)	Anemômetro Sônico 3D – Modelo CSAT3 – Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA.	10 Hz	10 Hz
Concentrações de CO ₂ (mg/m ³) e H ₂ O (g/m ³)	Analizador de gás de percurso aberto EC150 - Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA.	10 Hz	10 Hz

Fonte: elaborada pela autora (2024)

4.3 TRATAMENTO DOS DADOS OBSERVADOS

4.3.1 Balanço de energia

O balanço de energia das superfícies vegetadas permite dimensionar as trocas existentes entre a massa e energia do sistema solo-planta-atmosfera, por meio do estudo da partição do saldo de radiação nos processos de ocorrem na vegetação (LIMA *et al.*, 2005). Seguindo isso, esse balanço é descrito pela seguinte equação (PEREZ *et al.*, 1999):

$$R_n = G + H + LE \quad 01$$

Onde R_n é o saldo de radiação (W/m²), G é o fluxo de calor no solo (W/m²), H é o fluxo de calor sensível (W/m²) e LE o fluxo de calor latente.

O método do balanço de energia também pode ser baseado na razão de Bowen, no qual é obtida através das diferenças existentes entre a temperatura do ar e a pressão de vapor em dois níveis distintos (PEREZ *et al.*, 1999), no qual pode ser descrita pela equação abaixo:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad 02$$

Onde γ é a constante psicrométrica, ΔT a diferença de temperatura do ar e Δe a diferença da pressão de vapor. Então o fluxo de calor latente e calor sensível pode ser descrito pelas formulações abaixo:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad 03$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (Rn - G) \quad 04$$

4.3.2 Processamento de dados

Troca líquida de CO₂ do ecossistema (NEE) é a soma entre o fluxo turbulento de CO₂ (FCO_2), calculado a partir da covariância entre as flutuações da velocidade vertical do vento (w') e a densidade de CO₂ (c') e a taxa de variação do CO₂ armazenado na coluna do ar abaixo da altura das medidas EC (Sc), i.e.:

$$NEE = FCO + Sc \rightarrow (\mu mol m^{-2} s^{-1}) \quad 05$$

Em que:

$$FCO = \rho \cdot w'' c' \rightarrow (\mu mol m^{-2} s^{-1}) \quad 06$$

sendo ρ a densidade do ar e $w'' c'$ a covariância entre as flutuações da velocidade vertical do vento e a densidade de CO₂.

As médias de meia hora do Sc foram calculadas utilizando o método proposto por Aubinet et al. (2001) e amplamente utilizado em estudos subsequentes (ARAÚJO *et al.*, 2010; JENSEN *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017). Como não foi instalado nenhum perfil de concentração no local, optou-se pela abordagem discreta, considerando-se a concentração de CO₂ no interior da sua estrutura, podendo ser apenas uma aproximação (JENSEN *et al.*, 2017):

$$Sc = \frac{\Delta C_{CO_2} \cdot z}{(R \cdot T_a / P_a) \cdot \Delta t} \rightarrow (\mu mol m^{-2} s^{-1}) \quad 07$$

onde ΔC_{CO_2} é a alteração nas concentrações de CO₂ ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$), z é a altura do sistema EC acima do solo (m), R é a constante universal dos gases, T_a é a temperatura do ar (K), P_a é a pressão do ar ambiente sobre um intervalo de 30 minutos, Δt (s).

Os valores de FCO_2 foram calculados utilizando uma série de correções: detecção de spikes, correção da rotação de coordenadas usando o método planar fit, correção de temperatura virtual sônica, correções das flutuações das densidades dos fluxos (WPL-correction).

4.3.3 Controle de Qualidade de detecção de spikes

Os valores discrepantes de uma série temporal podem influenciar de maneira errônea os dados. Portanto, para diminuir esses efeitos utilizou-se o tratamento dos dados, no qual inicialmente usou-se o programa *spikes*, através do software R Studio, no qual é aplicado o método de kernel para detectar valores discrepantes entre os dados. Essa função utiliza o intervalo de confiança de 95% para a saída. De maneira geral, esse método retira manualmente os dados considerados espúrios, no qual os dados que apresentam esse problema são retirados e preenchidos por meio do algoritmo de amostragem de distribuição marginal, que é uma distribuição de probabilidade de variáveis que estão contidas no conjunto ou subconjuntos de variáveis (REICHSTEIN *et al.*, 2005; MENDES *et al.*, 2020)

Para a utilização do método *spikes* foram utilizadas as seguintes variáveis: Fluxo de calor sensível (H), Fluxo de calor latente (LE), Troca líquida de CO₂ pelo ecossistema (NEE), Radiação global (Rg), Temperatura do Solo (Tsolo), Umidade relativa (Ur) e Déficit de Pressão de Vapor (VPD).

O pós-processamento dos dados foi dividido em três etapas: i) avaliação da qualidade dos dados, sendo rejeitados os dados de baixa qualidade, dados associados ao mau funcionamento do sensor e dados visualmente inconsistentes; ii) os dados foram submetidos a um algoritmo robusto para a detecção de outliers seguindo o método proposto por Papale *et al.* (2006); iii) devido a condições de baixa turbulência ocorrer durante os períodos noturnos, os dados de fluxos noturnos foram rejeitados se a velocidade de fricção (u^*) esteve abaixo de um limiar crítico (0.18 a 0.44 m s⁻¹).

A estimativa do u^* -*threshold* foi baseada no algoritmo do teste de ponto móvel (MPT) em dados de tempo noturno, conforme descrito por Papale *et al.* (2006). Para eliminar as oscilações espúrias dos valores dos fluxos de CO₂ e energia foi utilizado um algoritmo baseado na análise de medianas (mediana móvel) para identificar as oscilações espúrias. O método consiste em separar a série de valores em uma parte suave e outra residual, após isso, remove-se manualmente os valores discrepantes. As lacunas oriundas da exclusão dos dados espúrios durante o processo de triagem foram preenchidas utilizando o algoritmo de *gap-filling* de amostragem de distribuição marginal (MDS) e que leva em consideração a covariação dos fluxos com as variáveis meteorológicas e também a auto correlação temporal dos fluxos (REICHSTEIN *et al.*, 2005). Neste algorítmico, três condições são identificadas com seus respectivos procedimentos: i) quando os dados de fluxo estão faltando, mas os dados meteorológicos estão disponíveis (Rg, Ta e VPD): o dado faltante é substituído pelo valor médio em condições meteorológicas semelhantes em uma janela de 7 dias, caso não se tenha condições

semelhantes, a janela é aumentada para 14 dias; ii) quando apenas valores da radiação estão disponíveis: o dado faltante é substituído pelo valor médio em condições meteorológicas semelhantes dentro de uma janela de 7 dias; iii) quando não há dado meteorológico disponível: o valor faltante é substituído pelo valor médio da última hora, sendo assim, considera a variabilidade diurna de cada variável. Após estas etapas, se os dados não forem preenchidos, o procedimento é repetido com tamanhos de janela maiores. Para o preenchimento das lacunas, foi utilizado uma ferramenta online automatizada disponibilizada pelo Instituto Max Plank (Max Planck Institute for Biogeochemistry - <https://bgc.iwww.mpg.de/5622399/REddyProc>).

4.3.4 Balanço de carbono

Os fluxos de CO₂ foram particionados para dividir o NEE em produtividade primária bruta – GPP (do ingles Gross Primary Production) e respiração do ecossistema (Reco). Utiliza-se um método de particionamento de fluxo baseado em tempo noturno de Reichstein *et al.* (2005). Para períodos noturnos, consideramos o GPP igual a zero e o NEE foi estimado conforme a seguir:

$$NEE = Reco, \text{ para períodos noturnos} \quad 08$$

$$NEE = Reco - GPP, \text{ para períodos diurnos} \quad 09$$

Os fluxos noturnos foram ajustados em relação a Ta usando a equação de Lloyd e Taylor (1994):

$$R_{eco} = R_{eco.ref} \cdot e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T_a-T_0} \right)} \quad 10$$

sendo, Reco ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a soma da respiração autotrófica e heterotrófica, Reco.ref a taxa de respiração em uma temperatura de referência Tref (15°C), E0 (K) é a energia de ativação ou a dependência de temperatura de Reco expressa em escalas de temperatura e T0 é a temperatura base ajustada para -42.02° C. Este modelo relaciona a Reco e Ta para os dados noturnos e esta função de resposta de temperatura é então usada para extrapolar os valores da Reco para os períodos diurnos. O Reco e a GPP foram calculados utilizando a ferramenta online disponibilizada pelo Instituto Max Plank (Max Planck Institute for Biogeochemistry - <https://www.bgc-jena.mpg.de/REddyProc/ui/REddyProc.php>).

4.4 MODELO

O Simple Tropical Ecosystem Model (SITE) foi desenvolvido por Santos e Costa 2004, sendo um modelo considerado simples, porém que leva em consideração diversos processos, entre eles os químicos, físicos e biológicos. Alguns deles são processos de radiação e aerodinâmicos, fisiologia, transpiração e balanço hídrico do dossel e fluxos de calor, energia e carbono. Foram realizadas quatro etapas de forma repetida, para o desenvolvimento do modelo, no qual o primeiro passo foi a realização de análises de outros modelos já existentes que envolvem essa mesma abordagem, o segundo foi a escolha da metodologia menos complexa utilizada pelos modelos, o terceiro passo foi a extinção do que consideraram irrelevante e o último passo a simplificação dos modelos matemáticos utilizados para a modelagem.

O modelo necessita de algumas variáveis como dados de entrada, entre elas a temperatura do ar (K), umidade específica ((kg H₂O/kg ar) , velocidade do vento (m/s), radiação solar incidente de onda curta (W/m²), radiação de onda longa (W/m²), precipitação (mm/hr). Além de necessitar de alguns parâmetros biofísicos da vegetação, sendo eles a altura do dossel, altura do dossel inferior, deslocamento no plano zero, rugosidade acima do dossel, porosidade total do solo e o teor de umidade. Esses parâmetros foram utilizados de acordo com o trabalho de Mendes *et al.* (2021) (Tabela 2), no qual os parâmetros que foram alterados foram os da altura das torres em que os dados coletados, no qual a altura da torre da área regenerada é de 11 metros.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para a simulação do modelo SITE

Parâmetros	Valores utilizados	Fontes
Altura da medição dos dados (z)	11 m	Medido no local
Altura do dossel (z1)	8 m	Medido no local
Altura do dossel mais baixo (z2)	5 m	Medido no local
Deslocamento no plano zero (d)	7.33 m	Estimado
Rugosidade acima do dossel (zh)	1.35 m	Estimado
Porosidade total do solo (Φ)	0.41 m ³ m ⁻³	Pagoto <i>et al.</i> , (2015); Costa <i>et al.</i> , (2013)
Capacidade de teor de umidade do local (Θ_{CC})	0.225 m ³ m ⁻³	Pagoto <i>et al.</i> , (2015); Costa <i>et al.</i> , (2013)

Teor de umidade (Θ_{PM})	0.151 m ³ m ⁻³	Pagoto <i>et al.</i> , (2015); Costa <i>et al.</i> , (2013)
-----------------------------------	--------------------------------------	---

Fonte: Adaptado de Mendes *et al.* (2021).

Como saída o modelo oferece algumas variáveis, dentre elas: o saldo de radiação, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível, troca líquida de CO₂ no sistema, produtividade primária líquida, produtividade primária bruta e o índice de área foliar. Com um valor para cada hora do respectivo dia, tendo no total 24 valores para cada dia do ano.

Tabela 3 - Parâmetros que serão calibrados: Área foliar específica (sla, m² folha kg⁻¹ C), dimensão típica das folhas (du, m), dimensão típica das hastes (ds, m), largura da folha (w, m), coeficiente de condutância estomática (m, adimensional), capacidade máxima da enzima Rubisco (Vmax, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e fração inicial de umidade do solo (θ_g/θ_d , adimensional). Onde θ_g é o teor de água do solo com base na massa expressa no teor de umidade do solo gravimétrico, θ_d é a umidade do solo.

Parâmetros	Estação chuvosa		Estação seca	Fonte
	Inicial	Fluxo de Energia e CO ₂ calibrado		
Area foliar específica (sla)	13.0	*16.5	*24.5	Pinho-Pessoa <i>et al.</i> , 2018, Mendes <i>et al.</i> 2021)
Dimensão típica das folhas (du)	0.072	0.056	0.032	Lima-Silva <i>et al.</i> , 2007, Mendes <i>et al.</i> 2021)
Dimensão típica das hastes (ds)	0.1	0.05	0.05	Lima-Silva <i>et al.</i> , 2007, Mendes <i>et al.</i> 2021)
Largura da folha (w)	0.1	0.06	0.03	Lima-Silva <i>et al.</i> , 2007, Mendes <i>et al.</i> 2021)
Coeficiente de condutância estomática (m)				(Dombroski <i>et al.</i> , 2011; Mendes <i>et al.</i> , 2017; Pinho

	10.0	*8.5	*5.0	Pessoa <i>et al.</i> , 2018, Mendes <i>et al.</i> 2021)
Capacidade máxima da enzima Rubisco (V_{max})	75×10^{-6}	*98 x 10⁻⁶	*54 x 10⁻⁶	(Rezende <i>et al.</i> , 2016; Pinho-Pessoa <i>et al.</i> , 2018, Mendes <i>et al.</i> 2021)
Fração inicial de umidade do solo ($\theta g/\theta d$)	0.36	*0.265	*0.175	(Costa <i>et al.</i> , 2013; Pagoto <i>et al.</i> , 2015, Mendes <i>et al.</i> 2021)

*indica os valores que foram calibrados para a área do estudo.

Fonte: Adaptado de Mendes *et al.* (2021)

Foi testada a calibração no modelo inicialmente realizado por Mendes *et al.* (2020) para uma área de Caatinga. Porém, devido às características distintas dos domínios fitogeográficos bem como as características sazonais da área estudada, foi necessário realizar novos ajustes nos parâmetros de vegetação e do solo (destacados com *Tabela 3).

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.5.1 Coeficiente de Correlação

Para análise de maneira estatística e confiável das simulações realizadas, foram adotadas algumas medidas que envolvem a estatística descritiva para serem apresentadas neste trabalho. Foi realizada a correlação de Pearson, no qual (FILHO e JÚNIOR, 2009) definem como sendo uma medida de associação linear entre variáveis, no qual é utilizada para analisar se existe relação entre duas variáveis e qual esse grau de relação. É válido ressaltar que esse tipo de correlação tem um foco principal para relações consideradas lineares. E conta com a fórmula abaixo:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{Y}}{S_y} \right) \quad 11$$

Ainda, segundo (FILHO e JÚNIOR, 2009), esse coeficiente de correlação Pearson (07) pode variar de -1 a 1, no qual o sinal sugere direção positiva ou negativa da relação entre as variáveis e o valor em si indica qual a força da relação entre as variáveis. Pode existir uma

correlação perfeita, sendo o mais próximo de 1 possível que indica que uma variável pode ser exatamente do mesmo valor de outra. Assim como, pode existir uma relação linear que neste caso, seu valor numérico é em torno de 0 (zero). Na tabela 4 constam os possíveis valores do r e sua interpretação.

Tabela 4 – valores de r e os possíveis resultados de interpretação

Valores de r	Resultados
$r = 0$	Não existe relação linear
$ r < 0,20$	Correlação desconsiderada
$0,20 < r < 0,40$	Correlação fraca
$0,40 < r < 0,60$	Correlação moderada
$0,60 < r < 0,80$	Correlação forte
$ r > 0,80$	Correlação muito forte

Fonte: Sousa, Áurea (2019)

O diagrama de dispersão é uma representação gráfica para dados bivariados quantitativos, separados em X e Y (MARTINS, 2014), no qual mostra se existe relação entre as variáveis e se é ou não linear. Esse diagrama indica que quanto mais perto os pontos ficam ao longo da reta, maior é o grau de associação existente entre duas variáveis estudadas. Caso a reta tenha um aumento, a associação é positiva, ou seja, caso uma variável aumente a outra também aumenta e caso a reta tenha um declive negativo existe uma associação negativa, indicando que as variáveis são inversamente proporcionais.

O grau de associação linear é mostrado através do coeficiente de correlação de Pearson ou pelo coeficiente de determinação (r^2).

Para entender se a correlação existente entre as variáveis é significativa foi adicionado o chamado p-valor, no qual é definido como sendo uma probabilidade de se observar um valor estatístico de teste maior ou igual ao encontrado (FERREIRA e PATINO, 2015). De maneira geral, o valor do corte para rejeitar a hipótese nula pode ser de 1% (0,01), 5% (0,05) ou 10% (0,10).

4.5.2 Análise dos erros

Para entender se a comparação entre os dados observados e simulados estão com valores

próximos ou não foram utilizadas algumas de erro. Inicialmente com o Erro da Média (ME) que é definido como a soma das variações dividida pela quantidade de itens (n), sendo considerada a diferença entre o valor medido e o valor real.

O Erro Médio Absoluto (MAE) é uma técnica para entender sobre o desempenho dos modelos de regressão, no qual mede a média da diferença entre o valor real e o valor simulado, porém devido a existência de valores negativos é preciso ser adicionado o módulo como a fórmula abaixo (12).

$$MAE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad 12$$

A Raiz do erro médio (RMSE) também foi utilizada. Ele calcula a raiz da média da diferença entre o valor simulado com o valor real. Isso é utilizado para não ter problema em lidar com variáveis que não tem as mesmas unidades. Esse erro é obtido pela formulação abaixo (13).

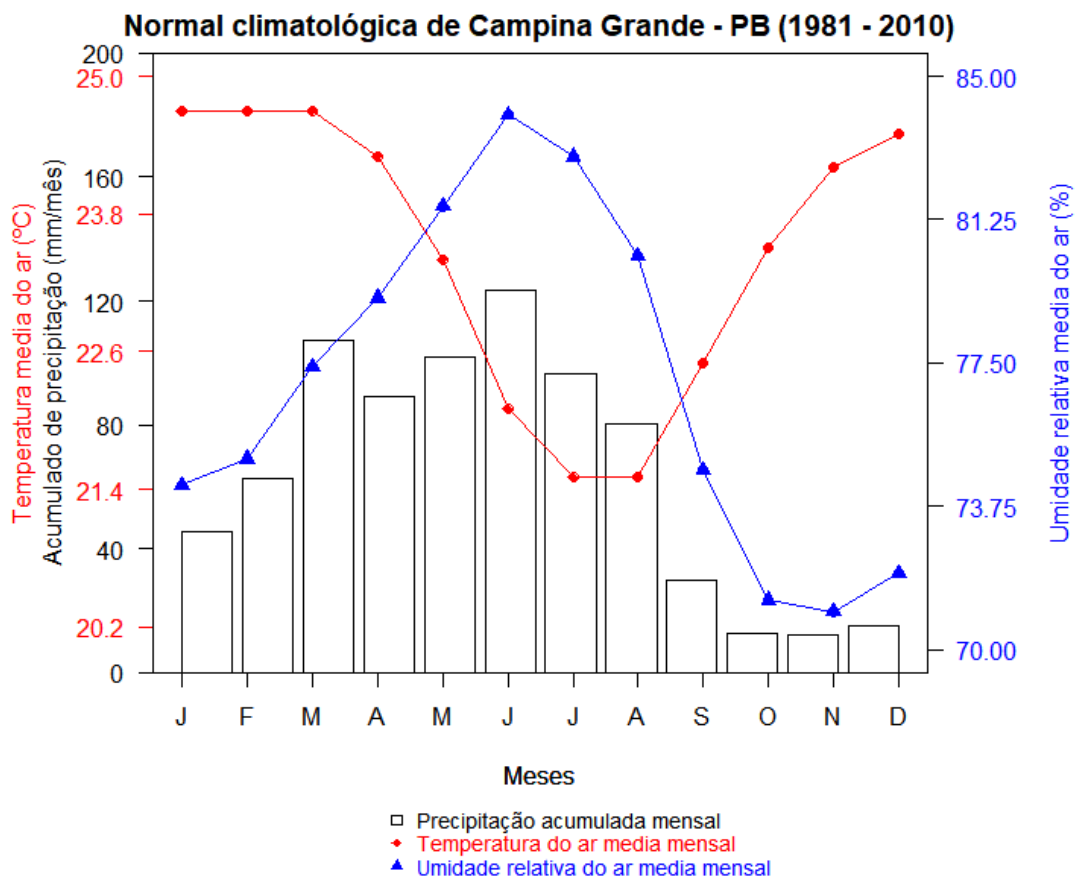
$$RMSE(y, \hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad 13$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CLIMATOLOGIA DE CAMPINA GRANDE

Na Figura 2 está apresentado o comportamento da normal climatológica da cidade de Campina Grande – PB entre os anos de 1981 e 2010 para as seguintes variáveis: precipitação (Gráfico de barras – preto), umidade relativa do ar (Linha – azul) e temperatura do ar (Linha – vermelha), obtidos através de dados de estações do INMET. Nota-se que a precipitação na cidade estaudada é superior nos meses de março a agosto, com os menores valores nos meses de outubro a dezembro. Essa mesma sazonalidade é vista para a umidade relativa do ar em que apresenta seu valor máximo no mês de junho, coincidindo com o mês com maior precipitação e menor valor no mês novembro, sendo o período que menos chove na região. Para a temperatura do ar os menores valores encontram-se no trimestre de junho a agosto, coincidindo com períodos de maiores precipitações e umidade relativa do ar. Os maiores valores foram nos meses de dezembro a fevereiro, período em que tanto a precipitação quanto a umidade relativa do ar estão em período de aumento dos seus valores.

Figura 2 – Normal climatológica de Campina Grande para a precipitação, umidade relativa e temperatura do ar.

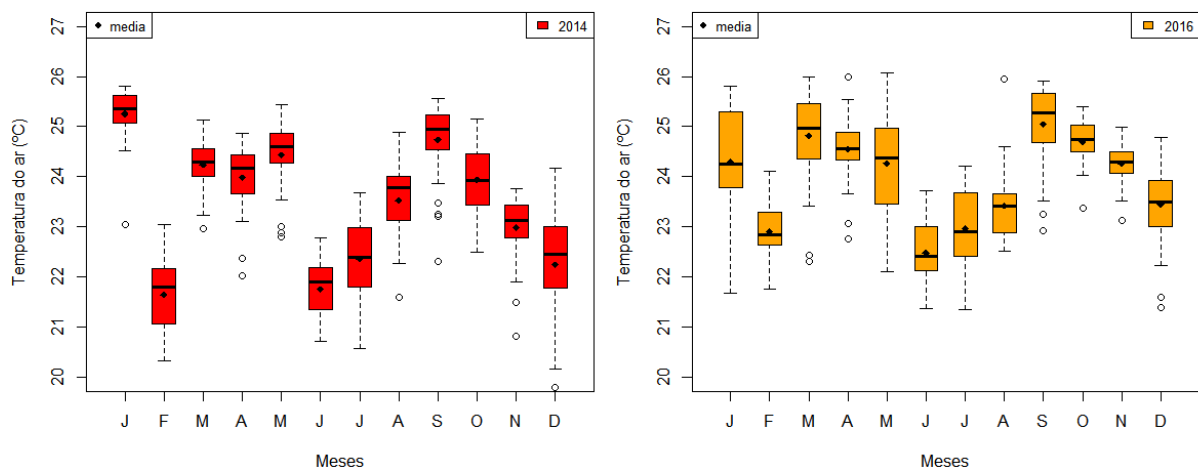


Fonte: elaborada pela autora (2024)

5.2 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Na Figura 3 está apresentado o comportamento mensal da variável temperatura do ar durante os anos de 2014 (*Boxplot* – vermelho) e 2016 (*Boxplot* – laranja) no município de Campina Grande, obtidos através de dados observados. Observa-se que, no ano de 2014, as temperaturas mínimas ocorreram nos meses de fevereiro, junho, julho e dezembro, no qual ficaram em torno de 20 °C. Enquanto que em 2016, houveram menores temperaturas no mês de janeiro também. As temperaturas máximas foram nos meses de janeiro, maio e setembro nos dois anos. Nota-se que os cinco meses iniciais do ano, com exceção de fevereiro, apresentam as temperaturas médias mais elevadas quando comparadas com os meses finais, no qual é visto uma queda acentuada a partir do mês de junho.

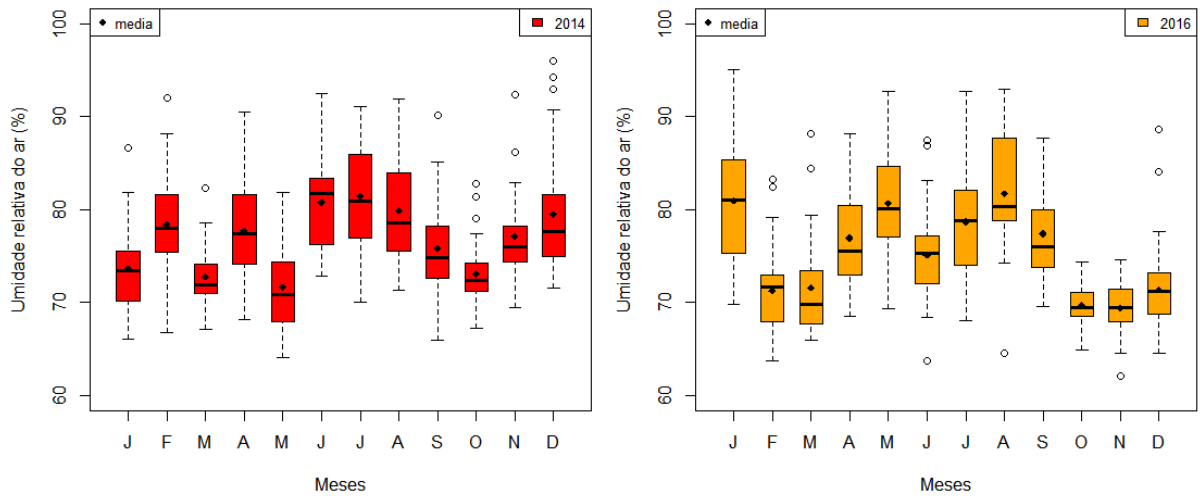
Figura 3 – temperatura do ar para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.



Fonte: elaborada pela autora (2024)

A Figura 4 mostra o comportamento mensal da umidade relativa do ar para os anos de 2014 (*Boxplot* – vermelho) e 2016 (*Boxplot* – laranja) no município de Campina Grande, obtidos através de dados observados. Observa-se que apesar dos anos estudados estarem inseridos em um período de seca para a região, a umidade não atingiu valores inferiores a 60%. Verifica-se que para os dois anos do período de junho a agosto apresentaram os maiores valores, além de apresentarem uma variabilidade significativa. Além disso, no trimestre final do ano, os valores aumentaram de forma gradativa nos dois anos.

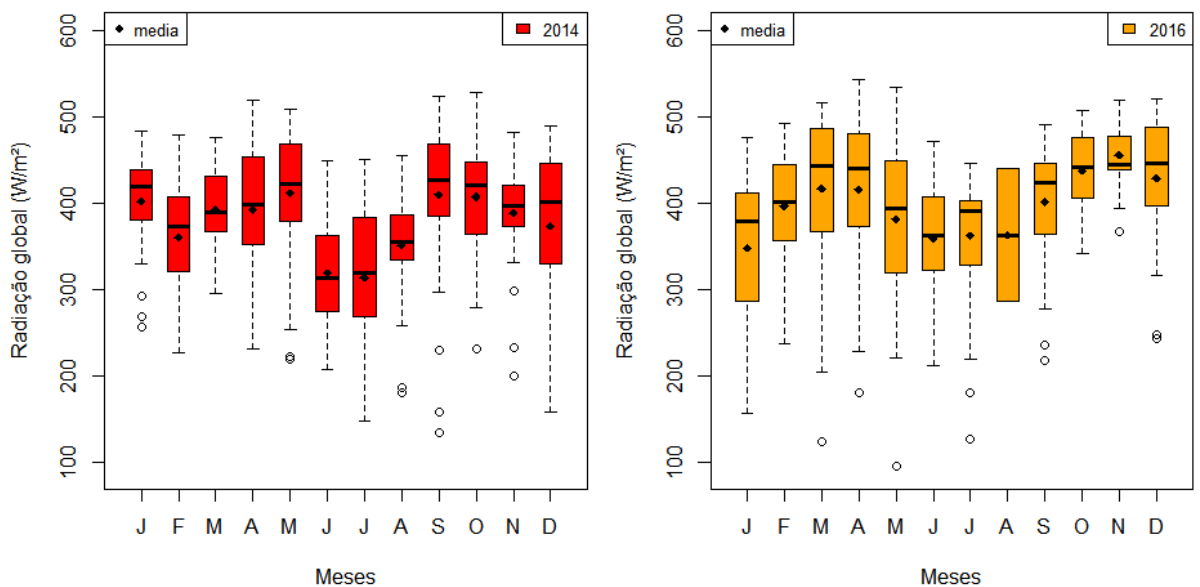
Figura 4 – umidade relativa do ar para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande



Fonte: elaborada pela autora (2024)

A Figura 5 mostra a radiação global mensal durante os dois anos (2014 e 2016), apenas para os horários durante o dia, no município de Campina Grande, obtidos através de dados observados. Observa-se que os meses que apresentaram maiores valores foram nos meses de setembro a maio, nos dois anos. Em 2014, esses valores chegaram a ultrapassar os 500 W/m^2 , assim como o ano de 2016. Os meses que apresentaram os menores valores encontram-se de no trimestre de junho a agosto em ambos os anos.

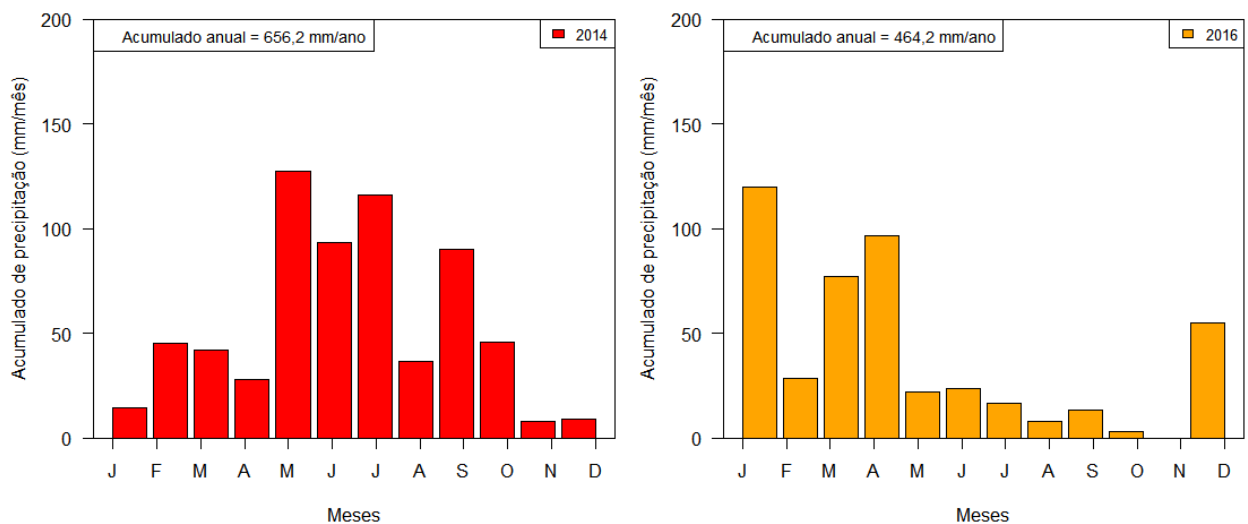
Figura 5 – radiação global durante o dia para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.



Fonte: elaborada pela autora (2024)

A Figura 6 mostra a precipitação acumulada mensal durante para o ano de 2014 (barras em vermelho) e 2016 (barras em amarelo) no município de Campina Grande, obtidos através de dados observados. Observa-se que os meses que apresentaram maiores valores em 2014 foram no trimestre de maio a julho e os que apresentaram os menores valores encontram-se nos meses de novembro a janeiro, no qual não ultrapassaram os 50 mm. Além disso, os meses com maior precipitação coincidem com os meses que obtiveram uma umidade relativa do ar maior e temperaturas do ar mais amenas. Em 2016, os meses com maior precipitação encontram-se de janeiro a abril, com exceção do mês de fevereiro. Já os menores valores estão entre os meses de agosto a novembro.

Figura 6 – precipitação acumulada mensal para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.



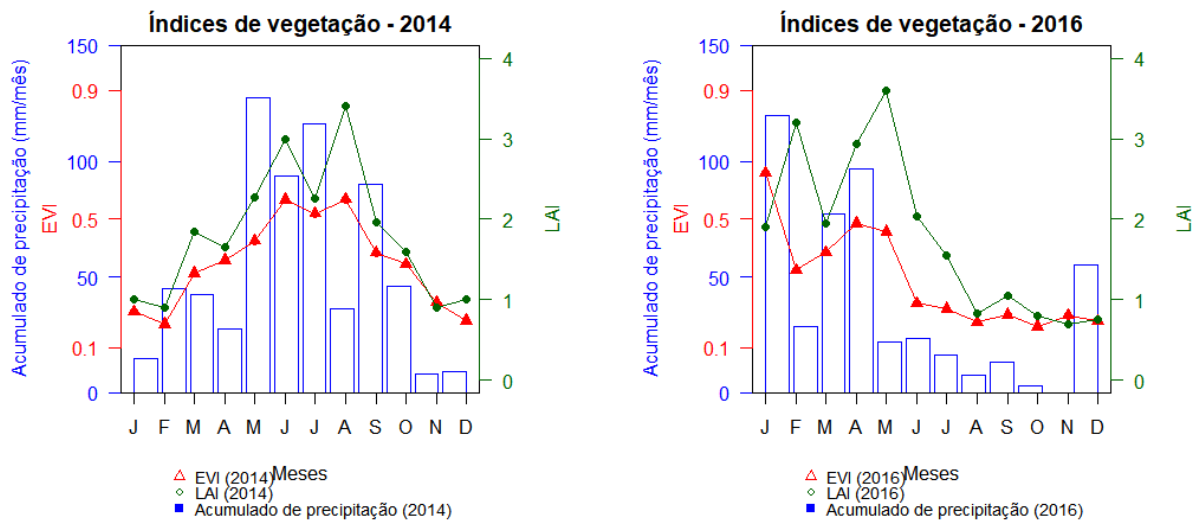
Fonte: elaborada pela autora (2024)

5.3 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

A resposta dos índices de vegetação da Caatinga às chuvas pode ser analisada através do gráfico EVI e LAI (Fig. 7). A variabilidade do EVI e LAI comportam-se de acordo com a sazonalidade das chuvas. O EVI em 2014 os valores foram mais altos nos meses de junho, julho e agosto, enquanto em 2016 foram entre os meses de janeiro a maio, com exceção do mês de fevereiro. O LAI também acompanha o comportamento do EVI em ambos os anos. O LAI apresenta valores que variam entre 0,75 e 4,0, enquanto os valores do EVI variaram de 0,1 na época seca para valores superiores 0,5 na época chuvosa. Esses resultados estão de acordo com o estudo de Almeida *et al.* (2019), no qual encontraram que variáveis hidrológicas, como a precipitação, evapotranspiração potencial e umidade do solo tem grande correlação com o IAF

(LAI). Além disso, concluíram que o LAI é o melhor entre os índices de vegetação para conseguir estimar o índice de área foliar em uma área de caatinga preservada. Mendes *et al.* (2020) observaram em um fragmento de Caatinga maiores valores de EVI durante a estação chuvosa, em torno de 0,42 (2014) e 0,38 (2015). Por outro lado, o EVI diminui consistentemente durante a estação de transição chuvosa-seca até atingir os seus valores mais baixos (0,16) durante a estação seca. A redução da cobertura vegetal na Caatinga, inferida pelos menores valores de LAI e EVI durante a estação seca, representa a senescência foliar na Caatinga, como mecanismo de resiliência ao estresse hídrico, conforme relatado por Marques *et al.* (2020).

Figura 7 – Índice de área foliar (Leaf area index, LAI), índice de Vegetação Aprimorado (EVI) acumulado de precipitação mensal para os anos de 2014 e 2016 na área do estudo.



Fonte: elaborada pela autora (2024).

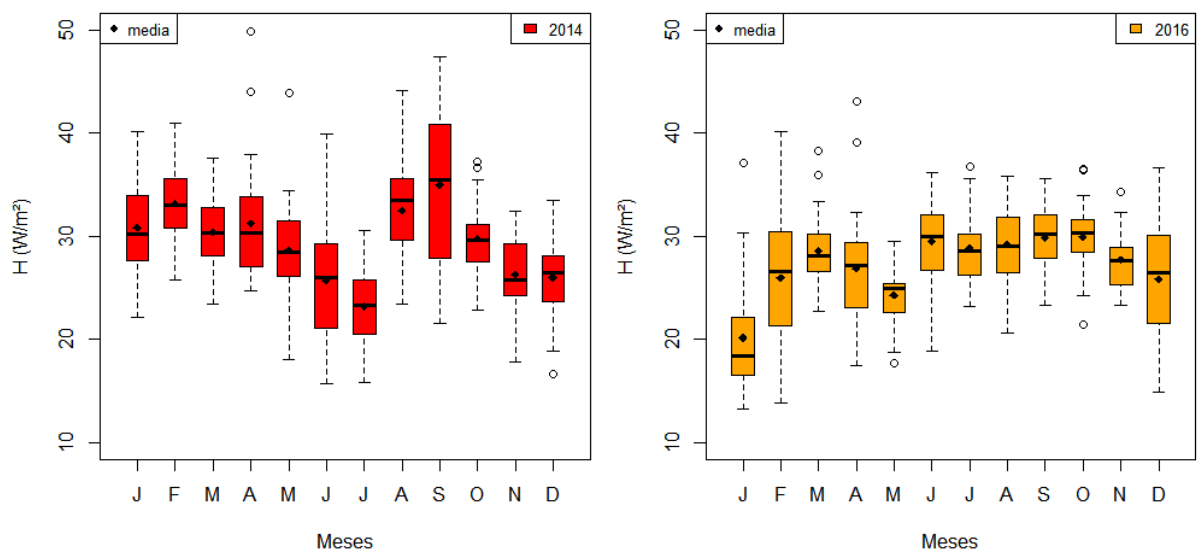
5.4 BALANÇO DE ENERGIA

Para análise do balanço de energia, inicialmente analisou o H no ano de 2014 (Boxplot – vermelho) e 2016 (Boxplot – laranja) (Figura 8), percebeu-se que os valores no decorrer dos dois anos não apresentaram uma sazonalidade marcada. No ano de 2014 os valores de H diminuem gradativamente no primeiro semestre do ano (janeiro a julho), no qual no mês de janeiro o valor máximo foi em torno de 40 W/m² e em julho esse valor chegou a 30 W/m². Porém, a partir do mês de agosto os valores aumentam de maneira significativa, visto que ultrapassam os 40 W/m² e continuam com esse aumento no mês de setembro, além de apresentar grande variabilidade neste mês. A partir de novembro esses valores voltam a diminuir e apresentam aumento no mês de janeiro apenas. Além disso, no período seco houve um aumento

do valor médio de 20% em relação ao período chuvoso. Em 2016, os menores valores encontram-se nos cinco meses iniciais, de janeiro a maio, ambos com valor máximo de 30 W/m². E os maiores valores de junho a dezembro, com valores máximos ultrapassando os 35 W/m². Nesse ano, o período seco mostrou um aumento do valor médio de 50% em relação ao período chuvoso.

Em Campos *et al.* (2019) os autores indicam que na vegetação da Caatinga, a maior parte da energia disponível é convertida em fluxo de calor sensível quando as precipitações são menores, ou seja, na estação seca, no qual é influenciada pelas características da vegetação e devido a ocorrência de mudanças do solo. Por isso, é esperado e válido que nos meses que existe menor precipitação o H seja mais elevado.

Figura 8 – Fluxo de calor sensível (H) para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.



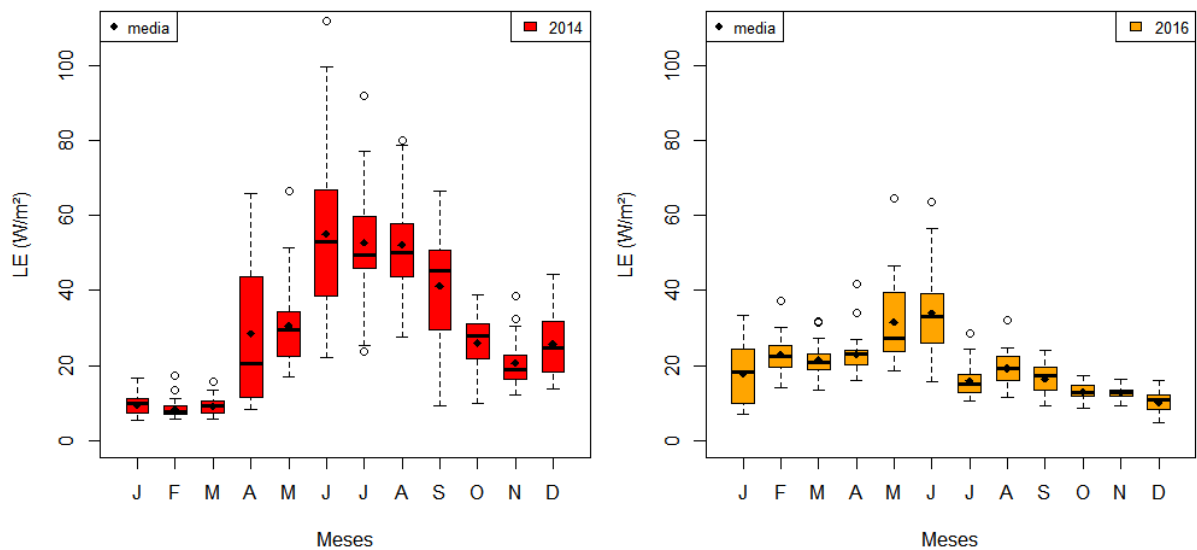
Fonte: elaborada pela autora (2024)

A Figura 9 apresenta o comportamento do fluxo de calor latente para os anos 2014 e 2016. Observa-se que no ano de 2014 a variação entre os valores mínimos e máximos foram significativos, com exceção para o primeiro trimestre do ano. Além disso, nota-se que os maiores valores foram entre os meses de abril a setembro, variando de 60 W/m² a 100 W/m², no qual também apresentaram alta variabilidade. Em contrapartida, os menores valores ficaram em torno de 10 W/m² entre os meses de outubro a março, com destaque para o mês de janeiro, que além de apresentar os menores valores também apresentou variabilidade muito baixa entre os valores. Em 2016, os maiores valores foram nos meses de maio e junho, variando de 40

W/m^2 a $60 W/m^2$. Enquanto que os menores valores ficaram em torno dos $10 W/m^2$ e encontram-se nos meses de outubro a dezembro, no qual não apresentaram variabilidade.

De maneira geral, o ano de 2014 consegue representar de maneira mais satisfatória o LE, no qual é maior no período chuvoso. Galvão *et al.* (2000), no qual acreditam que na estação chuvosa apresentando LE maior é devido a maior disponibilidade de água no ambiente, devido a maiores precipitações.

Figura 9 – fluxo de calor latente (LE) para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.

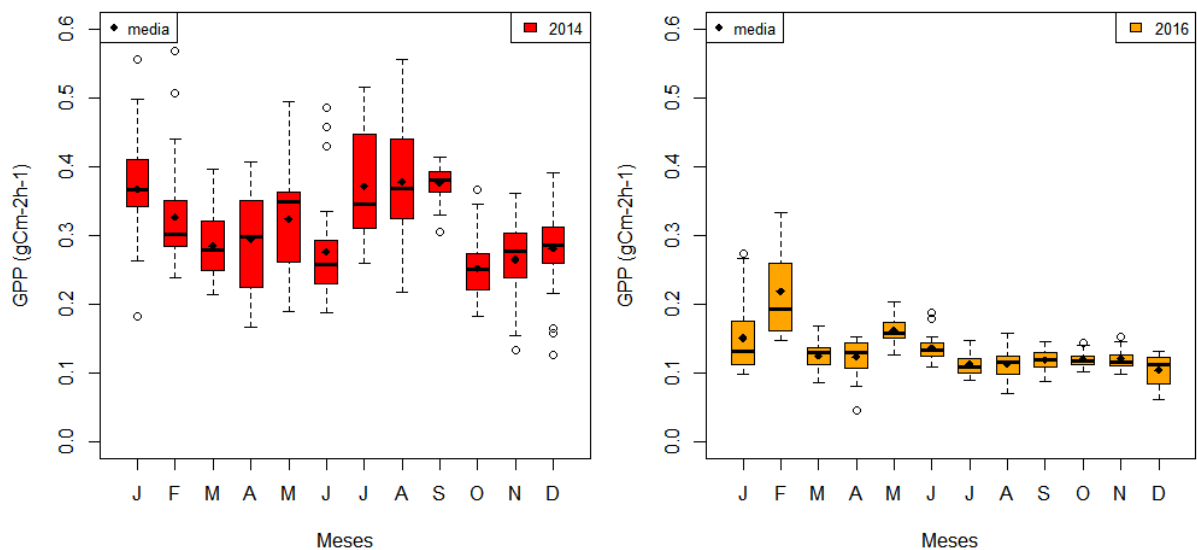


Fonte: elaborada pela autora (2024)

5.5 BALANÇO DE CARBONO

Os fluxos de CO_2 (GPP, Reco e NEE) foram fortemente influenciados pelos efeitos de fatores climáticos sazonais (Fig. 10, 11 e 12). Em 2014, os maiores valores foram vistos nos meses de maio a agosto, com valor máximo ultrapassando os $0,5 gCm^2h^{-1}$, enquanto os menores valores encontram-se nos meses finais do ano (em torno de $0,2 gCm^2h^{-1}$), entre os meses de outubro a dezembro, assim como com menor variação. Porém, o mês de setembro apesar de apresentar valores mais elevados, teve pouca variabilidade também. Em 2016, os maiores valores encontram-se nos meses de janeiro e fevereiro, com ênfase para o mês de fevereiro, no qual o valor máximo ultrapassa os $0,3 (gCm^2h^{-1})$. Além disso, nesse ano a maioria dos valores não tem grande variabilidade. Quando comparado com o ano de 2014, de maneira geral, os valores são menores, pois variam de $0,1$ a $0,3 gCm^2h^{-1}$.

Figura 10 – Comportamento do GPP para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.



Fonte: elaborada pela autora (2024)

Na Figura 11 apresenta-se o comportamento dos dados observados do NEE para os anos de 2014 e 2016. A partir disso, nota-se que, em geral, que o ano de 2014 apresentou uma grande variação entre os meses de abril a agosto. Além disso, os maiores valores também foram encontrados nesses meses, nos quais chegaram a ultrapassar os $1,0 \text{ KgCha}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. O NEE apresenta-se positivo quando o ecossistema é um sumidouro de carbono, já quando o valor é negativo o ecossistema é considerado como uma fonte de carbono. Observa-se que a partir do mês de abril alguns valores apresentam-se como positivos nessa época do ano, ou seja, quando o ecossistema funciona como sumidouro de carbono, coincidindo com o período mais chuvoso da região.

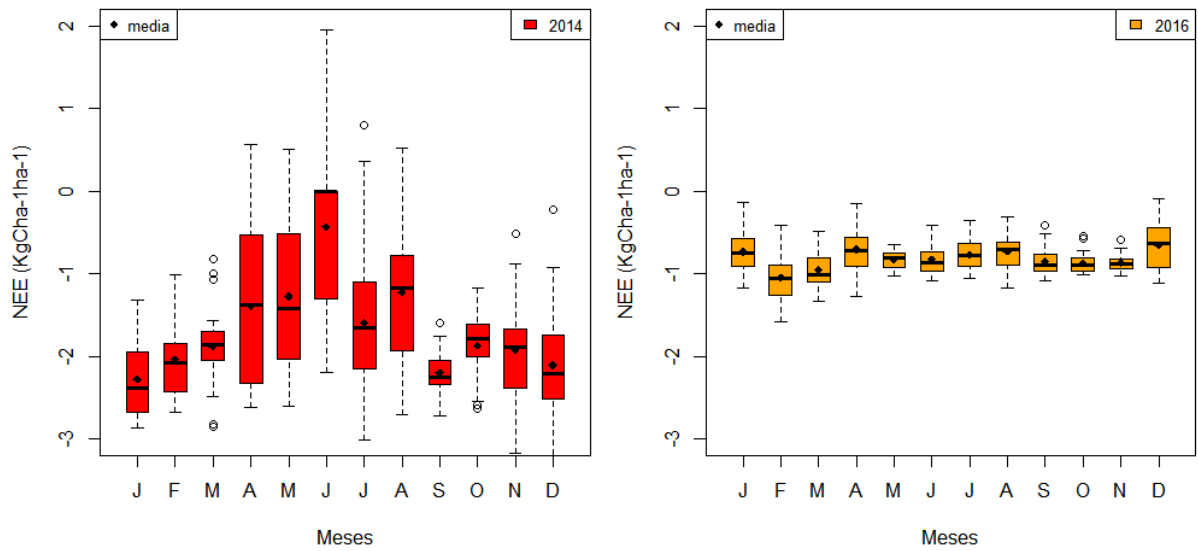
Segundo Marques (2022), é evidente que o efeito da precipitação afete tanto o GPP quanto o NEE, principalmente no ciclo diário. Sendo assim, essa menor variabilidade do NEE no ano de 2016 quando comparada com o ano de 2014 pode ser explicada pela precipitação, visto que o ano de 2016 apresentou uma menor quantidade de chuva e sem grande variabilidade, principalmente entre os anos de maio a novembro (Figura 6).

Resultados similares foram encontrados em Rocha *et al.* (2002) e Miranda *et al.* (1997) em que os autores encontraram que existe grande relação entre o NEE e a estação chuvosa, no qual o sistema é um sumidouro de carbono relacionado a estação chuvosa, mesmo o estudo sendo realizado para regiões do cerrado.

Segundo Mendes *et al.* (2021), a partir de resultados obtidos notaram que essa variável

(NEE) é diretamente proporcional à precipitação, pois encontraram que na estação chuvosa essa variável atingiu seus maiores valores. Por isso, os resultados explícitos na figura abaixo consolidam com resultados encontrados em trabalhos.

Figura 11 – Comportamento do NEE para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.



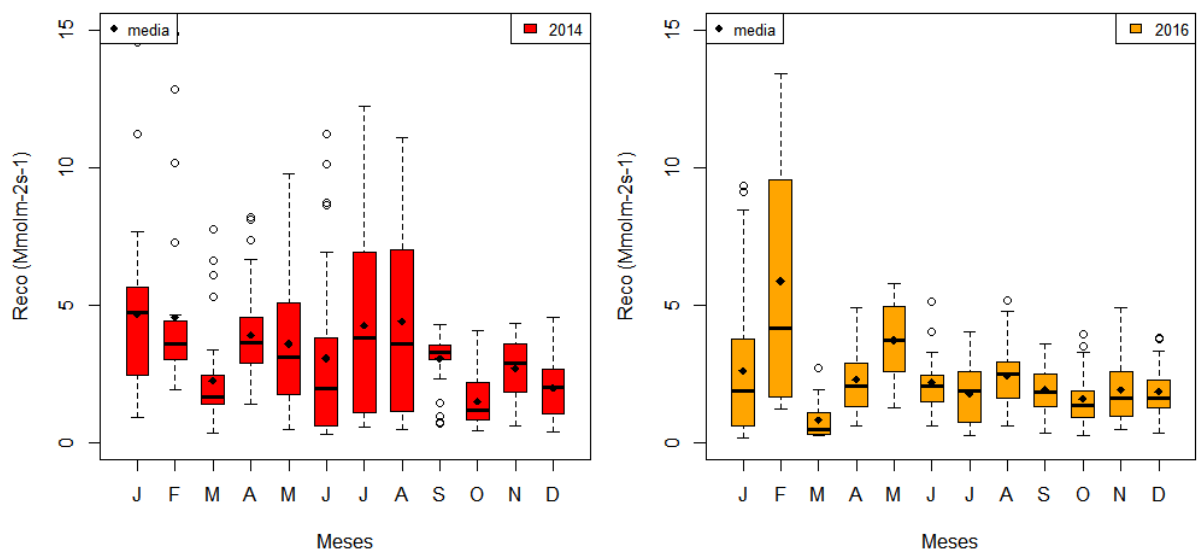
Fonte: elaborada pela autora (2024)

Na Figura 12 apresenta-se o comportamento do Reco para os anos de 2014 e 2016, no qual os maiores valores foram verificados nos meses de julho e agosto e os menores nos meses de outubro a dezembro, no ano de 2014. Além disso, nota-se que houve grande variação dos valores, principalmente entre os meses de maio e agosto e no mês de janeiro. No ano de 2016, esses valores foram maiores no início do ano, com grande variabilidade do mês de fevereiro e os menores valores nos meses finais do ano.

A produção primária bruta e o NEE aumentaram acentuadamente (valores negativos, controlados pela assimilação de CO_2) após a expansão foliar (EVI e LAI mais elevado) devido ao início da estação chuvosa, quando a umidade do solo é recarregada. Assim, durante a estação chuvosa, as taxas de GPP excederam o Reco e a Caatinga atuou como um sumidouro de carbono. A maior cobertura vegetal no bioma durante o ano de 2014 (Figura 7) também provocou um aumento na assimilação de CO_2 e, portanto, o NEE foi mais negativo naquele ano, em que as chuvas foram melhor distribuídas, corroborando os resultados relatados por Santos e Silva (2024) para uma área de Caatinga preservada, onde esses autores observaram maiores valores de NEE em respostas aos pulsos de chuvas ao longo de 2014.

Por outro lado, a redução dos valores de GPP e NEE (próximos de zero) com o declínio da precipitação está intimamente relacionada com a redução do EVI. Isto representa a senescência das folhas na Caatinga, um mecanismo de resiliência à seca que limita a atividade fotossintética às poucas espécies de plantas semidecíduas que conseguem manter suas folhas durante todo o ano (MARQUES *et al.*, 2020). Durante a estação seca, as árvores sofrem gradualmente com o declínio no conteúdo de água do solo, o que leva ao fechamento dos estômatos e à redução da condutância estomática e da transpiração das folhas, o que, por sua vez, limita a assimilação de CO₂ e reduz ainda mais a fotossíntese líquida (MENDES *et al.*, 2020).

Figura 12 – Comportamento do Reco para os anos de 2014 e 2016 na Caatinga - Campina Grande.



Fonte: elaborada pela autora (2024)

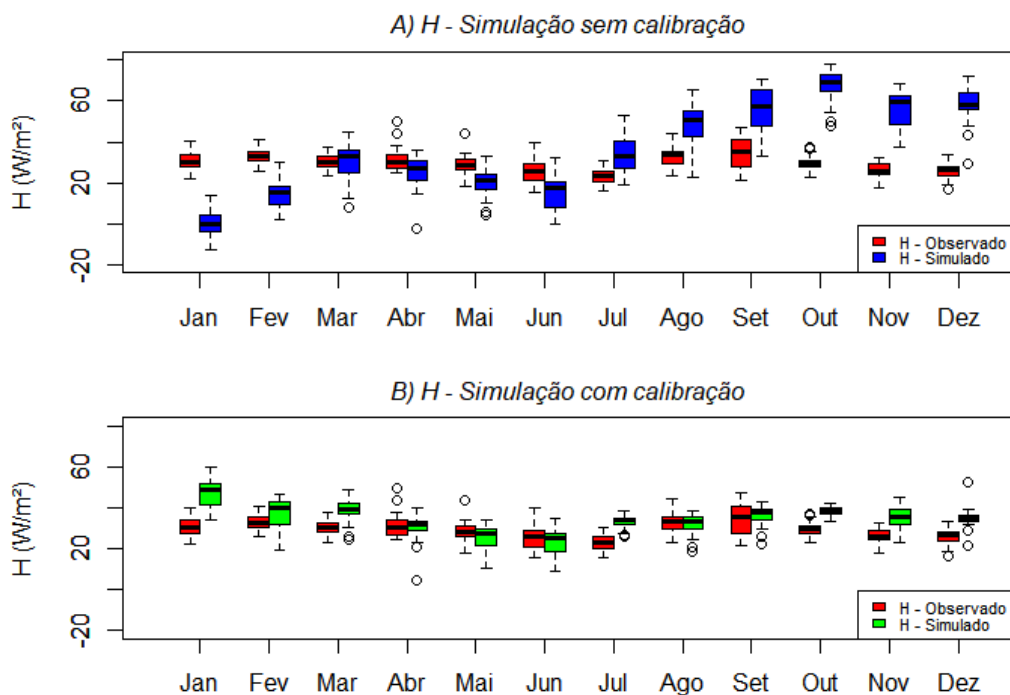
5.6 COMPARAÇÃO DOS DADOS OBSERVADOS E SIMULADOS

5.6.1 Balanço de energia - Simulações

Na Figura 13 apresentam-se o comportamento do fluxo de calor sensível para o ano alvo de estudo em duas simulações distintas, no qual a primeira (parte superior da figura) é a simulação controle e a segunda (parte inferior da figura) é a simulação controle que mais conseguiu se aproximar dos dados observados. Observa-se que na primeira simulação os dados simulados não estavam condizentes com o observado, no qual nos primeiros meses do ano, de maneira geral, eles subestimaram os valores, enquanto nos meses finais a simulação superestimou. Em contrapartida, na segunda simulação os valores apresentaram-se mais condizente, seguindo a mesma variabilidade entre os meses que foi vista nos dados observados.

Nota-se que os valores mínimos de H ocorreram na estação chuvosa entre os meses de maio, julho e julho. Esse resultado é condizente com o estudo apresentado por Mendes *et al.* (2021), em que a partir de uma análise com os valores médios, encontraram que os valores mínimos de H aconteceram no período chuvoso e os valores máximos, ocorreram no período seco, no qual é explicado devido a disponibilidade de água no solo no período chuvosos e devido a ausência de chuvas no período seco. Vale salientar, que o estudo comentado acima também foi realizado para uma área de caatinga, porém totalmente preservada e que não passou por nenhum processo de degradação. Resultados similares também foram encontrados no trabalho de Cunha *et al.* (2013), que também simulou o H, porém com outro tipo de modelo, o IBIS. Notaram que o H é maior no período de seca e tem uma queda no período chuvoso. Porém, diferentemente do que foi encontrado em Silva *et al.* (2021), não notou-se uma variabilidade de H na estação chuvosa, pois a variabilidade durante todo o ano foi pequena. Porém, vale salientar que a área estudada pelos autores passou por um forte processo de degradação e a área apresentada neste trabalho conseguiu se recuperar em sua totalidade.

Figura 13 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do fluxo de calor sensível (H). Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3.



Fonte: elaborada pela autora (2024)

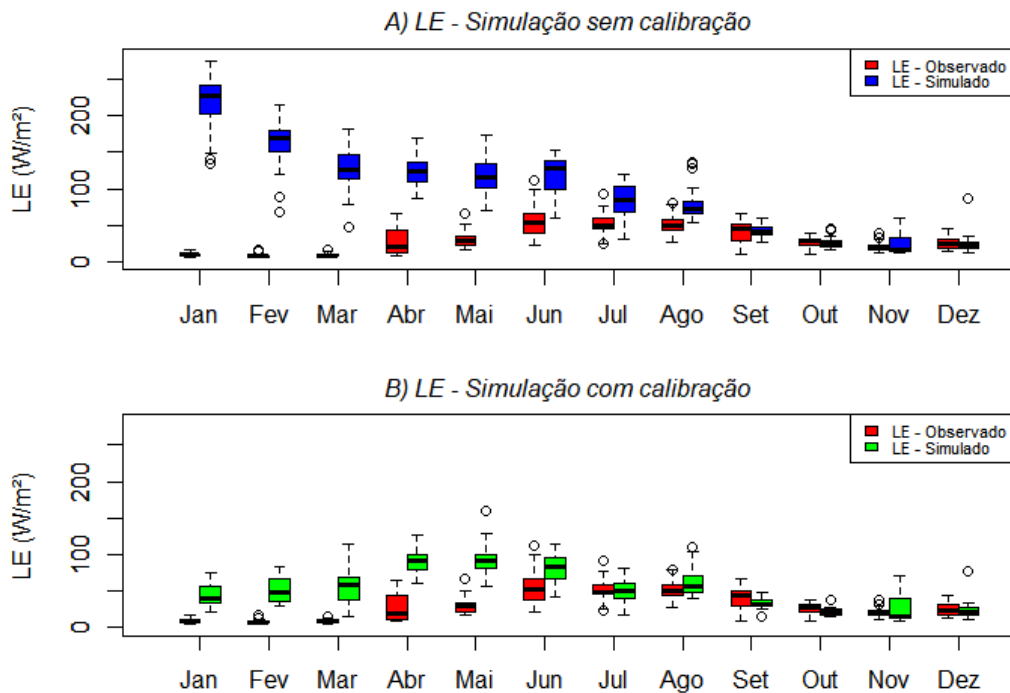
Apresentam-se na Figura 14 o comportamento do fluxo de calor sensível mensal para o ano de 2014, comparados os dados observados com duas simulações, no qual a primeira (parte de cima da figura) é a controle e a segunda (parte inferior da figura) é a calibrada. Nota-se que na simulação controle os dados foram muito superiores do que o que foi visto nos dados observados, com ênfase para os meses de janeiro a março, no qual esses valores foram significativamente distintos do esperado.

Esses resultados corroboram com o trabalho de Mendes *et al.* (2021), visto que nesse trabalho os valores de LE, mesmo sendo diários, foram superestimados quando utilizadas também a simulação sem calibração (controle). Por outro lado, a simulação com a calibração apresentou valores mais próximos dos observados, apesar de apresentarem alguns valores um pouco superestimados, conseguiram capturar o comportamento mensal visto nos dados observados. No trabalho de Mendes *et al.* (2021), o LE apresentou um bom ajuste no período chuvoso, o mesmo não ocorre neste trabalho, no qual o modelo superestima os valores de LE, nos seis meses iniciais do ano, pegando parte do período seco e chuvoso. Esse comportamento era esperado apenas para a estação seca. Tal variação pode ter ocorrido devido às análises terem sido feitas mensais e não diárias, como ocorreu no trabalho mencionado.

Além disso, os autores notaram que o LE apresentou valores significativamente diferentes no período seco, no qual o mesmo comportamento é encontrado neste trabalho, porém com ressalvas, já que em alguns meses do período chuvoso, como maio e junho, o modelo também superestimou os valores de LE, o que não ocorreu em Mendes *et al.* (2021), já que neste foram apenas no período seco.

Sanches *et al.* (2011) também fizeram aplicabilidade do modelo SITE para o H e LE, porém em uma região da Amazônia. Com isso, notaram que o modelo mesmo sendo feito para a região amazônica foi superestimado no período chuvoso, o mesmo que ocorre neste trabalho. Porém, no período seco, os autores notaram que o modelo foi satisfatório no período, o mesmo não ocorreu neste trabalho, pois também no período seco os valores, principalmente nos meses de janeiro a março, os valores foram superestimados.

Figura 14 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do fluxo de calor latente (LE). Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3.



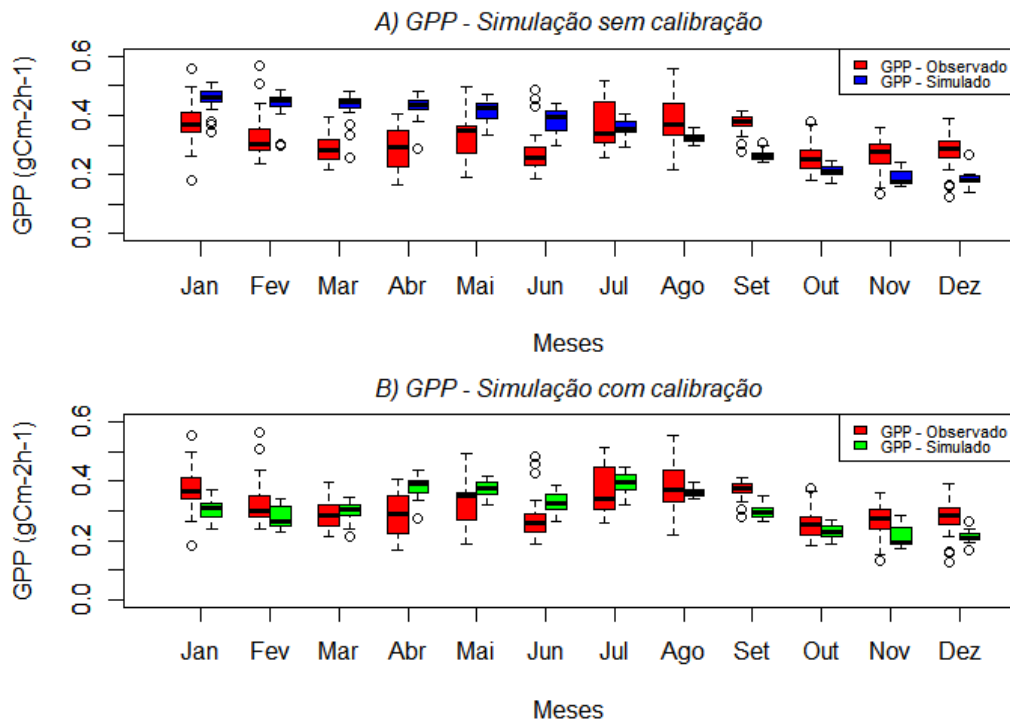
Fonte: elaborada pela autora (2024)

5.6.2 Balanço de carbono - Simulações

Na Figura 15 apresentam-se o comportamento do GPP para o ano de 2014 dos dados observados e dos dados simulados, no qual a primeira (parte de cima da figura) é a controle e a segunda (parte inferior da figura) com calibração. Para simulação calibrada utilizou-se duas simulações distintas, no qual uma ficou melhor para o período seco e outra ficou mais adequada para o período chuvoso. Na simulação controle, os valores do GPP simulados foram, em sua maioria, superestimados, no qual apenas a partir do mês de julho os valores começaram a ficar mais próximos, variando entre 0,3 e 0,5 g C m² h. Porém, apesar de conseguirem chegar a valores parecidos, não apresentaram uma variabilidade em comum. Porém, na simulação com calibração, os valores são mais próximos em todos os meses do ano e em sua maioria com variabilidade também parecida, apenas com exceção dos meses de agosto e abril que essa diferença é mais significativa.

Esses resultados corroboram, em partes, com os encontrados por Manoli *et al.* (2018), que encontraram valores mais baixos no início da estação seca. Porém, neste trabalho os autores entraram os valores máximos do GPP no final da estação seca, o que não ocorre neste trabalho, visto que os maiores valores são encontrados na estação chuvosa. Entretanto, vale salientar que o trabalho de Manoli *et al.* (2018) não foi realizado para uma área de Caatinga e sim em uma região tropical.

Figura 15 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do GPP. Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3.



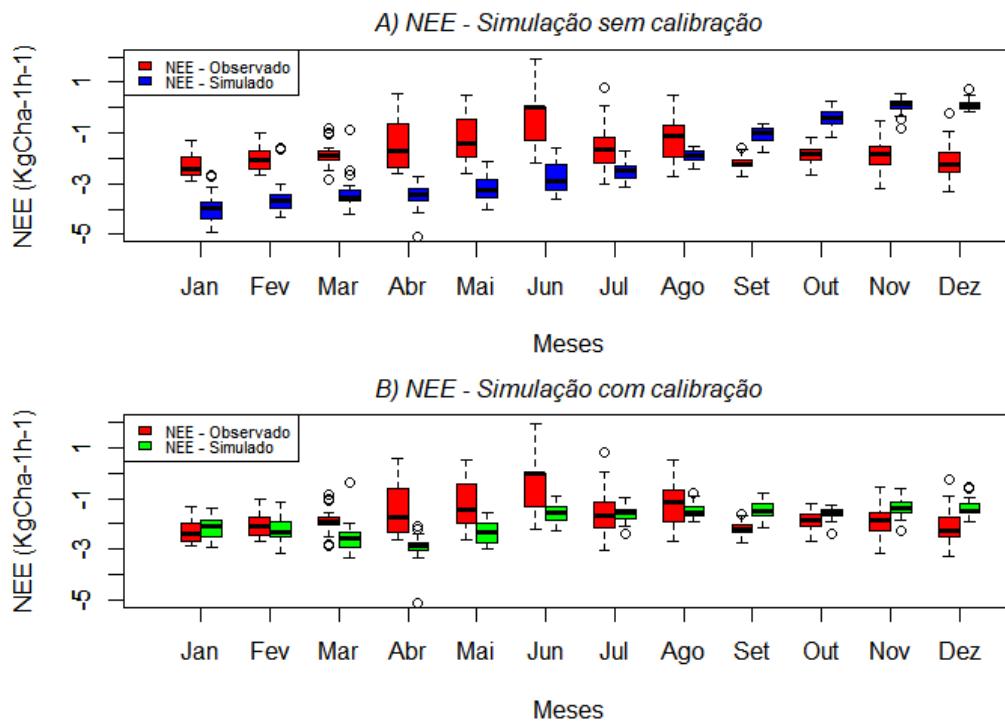
Fonte: elaborada pela autora (2024)

Na Figura 16 apresentam-se o comportamento da variável NEE para o ano de 2014 com os dados observados e as simulações controle (gráfico superior) e com calibração (gráfico inferior). Para o NEE foi comparado entre o observado e o simulados apenas os dados durante o dia, no qual foram retirados os dados noturnos da avaliação, para apenas analisar o NEE durante a fixação de CO₂. Observa-se que na simulação controle quando os dados observados se apresentam maiores, o simulado não conseguem captar e apresentam-se inferiores, enquanto que quando os dados observados são inferiores a simulação mostra-se superior. Entretanto, isso não ocorre na simulação com calibração, visto que ela consegue apresentar valores próximos em quase todos os meses do ano alvo de estudo, com exceção dos meses de abril, maio e junho que os valores observados são maiores e também apresentam maior variabilidade quando comparado com os dados observados. Porém, nos meses de janeiro e fevereiro, essa comparação entre observado e simulado apresentou valores muito próximos.

No trabalho de Mendes *et al.* (2021) os autores notaram um aumento do NEE no ano mais chuvoso, o que também acontece neste trabalho, no qual nos meses mais chuvosos o NEE

é maior. Assim, como notaram grande influência das chuvas sobre essa variável, o que também foi notado neste trabalho.

Figura 16 – Simulações sem calibração (boxplot azul, A), simulações com calibração (boxplot verde, B) e dados observados eddy covariance (boxplot vermelho) para os valores médios mensais do NEE. Barras verticais indicam o desvio padrão dos fluxos. Para detalhes sobre os parâmetros calibrados da simulação, ver Tabela 3.



Fonte: elaborada pela autora (2024).

5.7 TESTES DE CALIBRAÇÕES

Na Tabela 5 apresentam-se a correlação entre as variáveis que são da vegetação (NEE e GPP) e as outras variáveis do estudo (meteorológicas e dos fluxos de energia). Observa-se que quando diz respeito ao NEE, as variáveis que mais apresentam correlação é a precipitação, o déficit de pressão de vapor que leva em consideração não só a temperatura do ar, mas também a umidade relativa do ar e o fluxo de calor sensível, visto que são essas variáveis que apresentam uma correlação positiva. Além disso, a precipitação e o déficit de pressão de vapor apresentam um nível de significância de 0,1, no qual mostram que essa correlação é significativa.

Tabela 5 – Correlação entre a variáveis da vegetação e variáveis meteorológicas

	Correlação	
	NEE	GPP
Temperatura do ar	-0,32319111	0,6098696
Precipitação	0,08371191 +	-0,03215209 +
VPD	0,06281202 +	0,4336073
H	-0,3100281	-0,003955631 +
LE	0,5172903	-0,3526926

Significância: ***(0.001) **(0.01) *(0.05) +(0.1)

Fonte: elaborada pela autora (2024)

Apresentam-se na Tabela 6 as correlações entre os dados observados e as simulações controle e com calibração para as variáveis dos fluxos de calor sensível e latente. A partir disso, quando comparado o H observado com as simulações, nota-se que apenas a correlação com a simulação calibrada apresenta valor positivo, ou seja, quando os dados observados aumentam os dados da simulação calibrada acompanham esse comportamento. Porém, não é observado o mesmo comportamento na simulação controle. O mesmo acontece para a correlação de LE com as simulações, pois o valor da correlação com os dados não calibrados são negativos indicam que, de maneira geral, a simulação não acompanha os valores dos dados observados.

Tabela 6 – Correlação entre o observado e as simulações controle e com calibração das variáveis H e LE.

	Correlação	
	Simulação controle	Simulação calibrada
H - Observado	-0,02 **	0,13 +
LE - Observado	-0,27	0,18

Significância: ***(0.001) **(0.01) *(0.05) +(0.1)

Fonte: elaborada pela autora (2024)

Na tabela 7 observa-se os erros obtidos através da análise dos dados observados com os dados da simulação controle e com calibração para o H. Nota-se que os erros entre os dados observados e a simulação com calibração são inferiores quando comparados com os simulação controle. Porém, ainda assim são erros superiores a 5,00, o que indica uma não precisão desses dados.

Tabela 7 - Análise dos erros dos dados observados com as simulações calibradas e não

calibradas para o H.

Análise dos erros - H			
	ME	RMSE	MAE
Observado x Simulação controle	6,36	23,85	19,77
Observado x Simulação calibrada	5,15	10,59	8,69

Fonte: elaborada pela autora (2024)

Encontram-se na Tabela 8 os erros obtidos através da análise dos dados observados com os dados da simulação controle e com calibração para o LE. Nota-se o mesmo comportamento visto na Tabela anterior, visto que os da simulação com calibração apresenta valores menores, porém ainda com valores altos e muito distantes de 0.

Tabela 8 – Análise dos erros dos dados observados com as simulação calibradas e não calibradas para o LE.

Análise dos erros - LE			
	ME	RMSE	MAE
Observado x Simulação controle	63,38	96,12	69,52
Observado x Simulação calibrada	23,24	39,64	31,21

Fonte: elaborada pela autora (2024)

Apresentam-se na Tabela 9 as correlações entre os dados observados e as simulações controle e com calibração para o GPP. A partir disso, nota-se que tanto a correlação com a simulação controle quanto a com calibração são positivas, nesse caso a que apresenta este coeficiente mais próximo de 1 e a que passou pelo processo de calibração. Sendo assim, apresenta uma correlação mais forte entre os dados quando comparado com simulação controle.

Tabela 9 – Correlação entre o observado e os simulados com e sem calibração para o GPP.

	Correlação	
	Simulação controle	Simulação calibrada
GPP - Observado	0,20	0,28

Significância: ***(0.001) **(0.01) *(0.05) +(0.1)

Fonte: elaborada pela autora (2024)

Na Tabela 10 encontram-se os erros obtidos através da análise dos dados observados com os dados das simulação controle e com calibração para a variável GPP. Nota-se que os erros entre os dados observados e ambas as simulações apresentaram valores satisfatórios, ou seja, próximos a 0. Entretanto, comparando de modo geral, a com calibração apresenta valores menores, o que indica que entre esses dados apresentam valores próximos.

Tabela 10 – Análise dos erros dos dados observados com as simulações calibradas e não calibradas para o GPP.

Análise dos erros - GPP			
	ME	RMSE	MAE
Observado x Simulação controle	0,02	0,12	0,10
Observado x Simulação calibrada	-0,01	0,09	0,07

Fonte: elaborada pela autora (2024)

Apresentam-se na Tabela 11 as correlações entre os dados observados e as simulações controle e com calibração para o NEE. A partir disso, observa-se que a correlação entre os dados observados e a simulação calibrada apresentam valor mais próximo de 1, no qual uma relação linear mais positiva quando comparada com simulação controle.

Tabela 11 – Correlação entre o observado e os simulados com e sem calibração para o NEE.

	Correlação	
	Simulação controle	Simulação calibrada
NEE - Observado	-0,12 *	0,01**

Significância: ***(0.001) **(0.01) *(0.05) +(0.1)

Fonte: elaborada pela autora (2024)

Observa-se na Tabela 12 os erros obtidos através da análise dos dados observados com os dados da simulação controle e a com calibração para a variável NEE. Nota-se que os erros entre os dados observados e ambas as simulações apresentaram entre 0,00 e 2,00. Entretanto, comparando de modo geral as duas simulações, a com calibração apresenta valores menores.

Tabela 12 – Análise dos erros dos dados observados com as simulações calibradas e não calibradas para o NEE.

Análise dos erros - NEE			
	ME	RMSE	MAE
Observado x Simulação controle	-0,49	1,86	1,65
Observado x Simulação calibrada	-0,20	1,07	0,84

Fonte: elaborada pela autora (2024)

6 CONCLUSÕES

Observa-se que, de maneira geral, as variáveis estudadas, sendo elas o fluxo de calor latente, GPP, NEE, Reco e o índice de vegetação (EVI) foram condizentes e acompanharam o padrão sazonal das chuvas, visto que nos meses em que a precipitação foi maior (maio, junho e julho), as temperaturas apresentaram valores mais baixos, a umidade relativa do ar apresentou valores mais altos, o fluxo de calor sensível foi menor devido aos efeitos da temperatura do ar e fluxo de calor latente maior, pois apresentou maior disponibilidade de água nesse período para ocorrer maior evaporação. O GPP e o NEE também acompanharam o comportamento das chuvas e apresentaram valores mais elevados nesses meses. Assim como, uma maior cobertura vegetal. Além disso, o NEE funcionou em sua grande parte como sumidouro de carbono, ou seja, a vegetação absorve mais carbono da atmosfera do que emite, no qual acaba diminuindo a quantidade da substância na atmosfera.

Após análises e correções dos dados observados foram realizadas duas simulações, por meio do SITE, uma chamada de controle e outra com calibração, para as variáveis do fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente, produtividade primária bruta e troca líquida de CO₂ pelo ecossistema. No qual, nota-se que, de maneira geral, os valores simulados através do modelo SITE se aproximam dos dados observados provenientes da torre micrometeorológica, no ambiente de caatinga recuperada, no qual nota-se que, de maneira geral, o modelo consegue simular de maneira satisfatória essas variáveis. Assim como, também mostrou uma boa aplicabilidade, no qual conseguiu simular não só os valores, mas principalmente, as variações sazonais tanto dos fluxos de energia como de CO₂. No caso do NEE, os dados para serem comparados foram utilizados apenas os dados durante o dia, pois o modelo apresentou problemas para calibrar os dados noturnos dessa variável. No GPP foram utilizadas duas simulações diferentes na simulação calibrada, pois necessita de uma calibração para os meses mais chuvosos e outra para os meses mais secos, ou seja, uma única calibração não é capaz de mostrar valores satisfatórios nos dois períodos.

Nota-se que o H se mostrou maior no período de seca e com uma queda no período chuvoso, resultados condizentes com o que foi visto em outros trabalhos. Entretanto, apesar de o LE apresentar maiores valores no período chuvoso, o modelo ainda superestimou os valores, o que não era esperado, pois em áreas de Caatinga mostradas em estudos, o modelo conseguiu simular o LE no período chuvoso.

Vale salientar que existe uma dificuldade de se medir principalmente o balanço de carbono em grandes áreas de Caatinga, devido ser algo de elevado custo. Por isso, é de grande relevância a existência de estudos como esse que fazem a validação de modelos capazes de

simular essa dinâmica para entendermos sobre como os variados tipos de vegetação presente no bioma da Caatinga respondem a questões ligadas a absorção ou emissão de CO.

REFERÊNCIAS.

Agencia Executiva de Gestão das Águas (AESAs). Climatologia.

AB'SABER, Aziz Nacib. O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras. **Geomorfologia**, n. 43, p. 1-39, 1974.

ALVES, Jose Jakson Amancio et al. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, p. 126-135, 2009.

ALMEIDA, Cicero Lima de; DE CARVALHO, Thayslan Renato Anchiêta; DE ARAÚJO, José Carlos. Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 279, p. 107705, 2019.

ANDRADE, N.L.R. Fluxos de energia em área de floresta de Transição Amazônia – Cerrado modelados pelo SITE. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2009.

ARAÚJO, A. et al. The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. **Agric. For. Meteorol.** 2010, 150, 226–237.

AUBINET, Marc et al. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, n. 4, p. 293-315, 2001.

BARBOSA NETO, Manuella Vieira et al. Avaliação do uso da terra, degradação dos solos e análise multitemporal da cobertura vegetal no semiárido pernambucano. In: **Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE)**; Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 35, 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

BARROS, Maria Fabíola Gomes da Silva de. Regeneração natural da caatinga após agricultura: mudanças nas diversidades taxonômica, funcional e filogenética nas assembleias de plantas. 2018.

BAUDENA, M. et al. A model for soil-vegetation-atmosphere interactions in water-limited ecosystems. **Water Resources Research**, v. 44, n. 12, 2008.

BIOMAS, I. B. G. E. Sistema Costeiro-Marinho do Brasil: compatível com a escala 1: 250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

BIUDES, Marcelo Sacardi et al. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 56-64, 2009.

BORGES, Camilla K. et al. Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 8, p. 1-18, 2020.

CAMPOS, Suany et al. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 271, p. 398-412, 2019.

CERRI, Carlos Eduardo P. et al. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, 64:83-99, 2007.

- CHAVES, Iêde de Brito et al. Modelagem e mapeamento da degradação da caatinga. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 183-195, 2015.
- COSTA, Carlos Alexandre Gomes et al. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Rev. Ciênc. Agron.** 2013, 44, 685–694.
- CUNHA, Ana Paula MA et al. Calibration and validation of the integrated biosphere simulator (IBIS) for a Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, n. 12, p. 2753-2770, 2013.
- DANTAS, Leydson Galvêncio et al. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em Campina Grande-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 423-434, 2015.
- DA SILVA, Paulo Ferreira et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.
- DE ARAUJO, Alessandra Carioca et al. The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 226-237, 2010.
- DE JESUS, Janisson Batista et al. Temporal and phenological profiles of open and dense Caatinga using remote sensing: response to precipitation and its irregularities. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 1067-1076, 2021.
- DE OLIVEIRA, Michele L. et al. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. **Science of the Total Environment**, v. 792, p. 148458, 2021.
- DE SOUZA, Luciana Sandra Bastos et al. Comportamento do albedo durante o período chuvoso em uma área de Caatinga degradada na região da Chapada do Araripe, PE. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: Congresso Brasileiro DE Meteorologia, 17; Encontro de Meteorologia dos Países do Mercosul e Associados, 1; Encontro de Meteorologia Operacional, 2. 2012. Gramado: UFRGS, 2012., 2012.
- DOMBROSKI, J. L. D. et al. Water relations of Caatinga trees in the dry season. **South African Journal of Botany**, v. 77, n. 2, p. 430-434, 2011.
- FERNANDES, Gabriel ST et al. Available on line at Directory of Open Access Journals. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing** v, v. 9, n. 3, p. 131-137, 2019.
- FERNANDES, Moabe Ferreira; QUEIROZ, Luciano Paganucci de. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e cultura**, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.
- FERREIRA, Juliana Carvalho; PATINO, Cecilia Maria. O que realmente significa o valor-p?. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 41, p. 485-485, 2015.
- FILHO, Dalson Britto Figueiredo; JÚNIOR, José Alexandre Silva. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.
- FONSECA, Luiz Carlos Neves da et al. CO₂ fluxes in oil palm plantation in eastern Amazonia. Volume 33, Número 1, Pags. 181-192, 2018.

- FONTANA, Denise Cibys; BERLATO, Moacir. Antônio; BERGAMASCHI, Homero. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.403-410, 1991.
- GALVÃO, José Alexandre da Costa; FISCH, Gilberto. Balanço de energia em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia (Ji-Paraná, RO). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 25-37, 2000.
- GIONGO, Vanderlise. Balanço de carbono no Semiárido brasileiro; perspectivas e desafios. 2011.
- GOMES, Daniel da Silva et al. CO₂ flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 1898-1908, 2021.
- JENSEN, Rasmus; HERBST, Mathias; FRIBORG, Thomas. Direct and indirect controls of the interannual variability in atmospheric CO₂ exchange of three contrasting ecosystems in Denmark. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 12-31, 2017.
- LIMA, José R. de S. et al. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 527-534, 2005.
- LIMA-SILVA, P.S.L. et al. Equations for leaf area estimation in some species adapted to the Brazilian Semi-arid. **Rev. Caatinga**, 2007, 20, 18–23.
- LLOYD, John; TAYLOR, J. A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional ecology**, p. 315-323, 1994.
- MANOLI, Gabriele et al. Dry-season greening and water stress in Amazonia: The role of modeling leaf phenology. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 123, n. 6, p. 1909-1926, 2018.
- MAPBIOMAS, PROJETO. Desmatamento, queimadas e retração da superfície da água aumentam o risco de desertificação da caatinga. **Map Biomas Brasil**, 2021.
- MARQUES, Ana Maria Sousa. Variabilidade interanual das trocas de energia e CO₂ em uma área remanescente do Bioma Caatinga sob condições extremas de precipitação. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- MARQUES, Thiago Valentim et al. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, p. 107957, 2020.
- MARTINS, E.G.M., (2014). Diagrama ou gráfico de dispersão, **Rev. Ciência Elem.**, V2(3): 2014.
- MENDES, Keila Rego et al. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 9454, 2020.
- MENDES, Keila Rego et al. Assessment of SITE for CO₂ and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). **Forests**, v. 12, n. 1, p. 86, 2021.
- MENDES, Keila Rego et al. Interannual Variability of Energy and CO₂ Exchanges in a Remnant Area of the Caatinga Biome under Extreme Rainfall Conditions. **Sustainability**, v. 15, n. 13, p. 10085, 2023.

- MIRANDA, A. C. et al. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. **Plant, Cell & Environment**, v. 20, n. 3, p. 315-328, 1997.
- MORAIS, Ygor Cristiano Brito et al. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 585-599, 2017.
- NASCIMENTO, Katarina Romênia Pinheiro et al. Impacto da precipitação e do uso e ocupação do solo na cobertura vegetal na Caatinga. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 221-231, 2020.
- NOBRE, Carlos A.; NOBRE, Antônio D. O balanço de carbono na Amazônia brasileira. **Estudos avançados**, v. 16, p. 81-90, 2002.
- OLIVEIRA, Maria Betania Leal et al. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. 2006.
- PAGOTO, Mariana Alves et al. Influence of regional rainfall and Atlantic sea surface temperature on tree-ring growth of *Poincianella pyramidalis*, semiarid forest from Brazil. *Dendrochronologia* 2015, 35, 14–23.
- PANDEY, Pankaj K. et al. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 4, n. 1, p. 52-63, 2016.
- PAPALE, Dario et al. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. **Biogeosciences**, v. 3, n. 4, p. 571-583, 2006.
- PEREIRA, Arthur Prudêncio de Araujo et al. Land degradation affects the microbial communities in the Brazilian Caatinga biome. **Catena**, v. 211, p. 105961, 2022.
- PEREZ, P. J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, n. 3, p. 141-150, 1999.
- PINHEIRO, Katarina Romênia et al. Impacto da precipitação e do uso e ocupação do solo na cobertura vegetal na Caatinga. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 221-231, 2020.
- PINHO-PESSOA, Ana CB et al. Interannual variation in temperature and rainfall can modulate the physiological and photoprotective mechanisms of a native semiarid plant species. **Indian Journal of Science and Technology**, p. 1-17, 2018.
- PIRES, Wilis Neiva et al. Fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d'água em uma área de Caatinga em regeneração. 2017.
- PRADO, Darién E. As caatingas da América do Sul. *Ecologia e conservação da Caatinga*, v. 2, p. 3-74, 2003.
- REICHSTEIN, M. et al. Sobre a separação da troca líquida do ecossistema em assimilação e respiração do ecossistema: revisão e algoritmo aprimorado. **Glob. Alterar biol.** 11, 1424–1439 (2005).
- REZENDE, L. F. C. et al. Calibration of the maximum carboxylation velocity ($V_c \text{ max}$) using

data mining techniques and ecophysiological data from the Brazilian semiarid region, for use in Dynamic Global Vegetation Models. **Brazilian Journal of Biology**, v. 76, p. 341-351, 2016.

ROCHA, Humberto R. da et al. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado *Sensu stricto*) in southeast Brasil. **Biota Neotropica**, v. 2, p. 1-11, 2002.

RODRIGUES, Jozé André de Moraes et al. Spatial-temporal dynamics of Caatinga vegetation cover by remote sensing in the Brazilian semiarid region. *Dyna*, v. 87, n. 215, p. 109-117, 2020.

RODRIGUES, Talmo Manhães de França et al. Simulação dos impactos climáticos da desertificação do Nordeste brasileiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 1037-1047, 2019.

ROSA, Gilberto Quevedo. Estoque de carbono em diferentes usos da terra e dinâmica das raízes finas em floresta tropical seca. 2018.

SAMPAIO, Everardo et al. Tree biomass estimation in regenerating areas of tropical dry vegetation in northeast Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 6, p. 1135-1140, 2010.

SAMPAIO, Everardo Valadares de Sá Barretto et al. Regeneração da vegetação de caatinga após corte e queima, em Serra Talhada, PE. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 5, p. 621-632, 1998.

SANCHES, Luciana et al. Performance evaluation of the SITE® model to estimate energy flux in a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. **International journal of biometeorology**, v. 55, p. 303-312, 2011.

SANTOS, Silvia N. Monteiro; COSTA, Marcos Heil. A simple tropical ecosystem model of carbon, water and energy fluxes. **Ecological Modelling**, v. 176, n. 3-4, p. 291-312, 2004.

SENAY, Gabriel B. et al. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 171-185, 2016.

SILVA, Suany Campos da. Padrões sazonais e anuais do fechamento e do particionamento do balanço de energia em uma área de Caatinga preservada sob condições de seca extrema. 2019.

SILVA, Any Caroline et al. Energy Balance, CO₂ Balance, and Meteorological Aspects of Desertification Hotspots in Northeast Brazil. **Water**, v. 13, n. 21, p. 2962, 2021.

SILVA, Paulo Ferreira et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.

SOUSA, Áurea. Diagrama de dispersão, correlação e regressão linear. *Correio dos Açores*, p. 16-16, 2019.

SOUZA, Bartolomeu Israel de et al. Temperatura dos solos e suas influências na regeneração natural da caatinga nos Cariris Velhos–PB. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 35, p. 261-287, 2016.

TABARELLI, Marcelo et al. The future of the Caatinga. In: **Caatinga**. Springer, Cham, 2017. p. 461-474.

WALKER, Auriana Miranda et al. Estudo de regeneração natural em área de manejo de

Caatinga-Petrolina, PE. 2011.

WUTZLER, Thomas et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. **Biogeosciences**, v. 15, n. 16, p. 5015-5030, 2018.