



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS**



MICHELE LAURENTINO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA DINÂMICA DOS FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO EM
DIFERENTES COBERTURAS DO SOLO NO NORDESTE
BRASILEIRO**

Campina Grande – PB
2023

MICHELE LAURENTINO DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA DINÂMICA DOS FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO EM
DIFERENTES COBERTURAS DO SOLO NO NORDESTE
BRASILEIRO**

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, para obtenção do título de Doutora.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Naturais
Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos
Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos

Campina Grande – PB
2023

O48a

Oliveira, Michele Laurentino de.

Análise da dinâmica dos fluxos de água e carbono em diferentes coberturas do solo no Nordeste brasileiro / Michele Laurentino de Oliveira. – Campina Grande, 2023.

106 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos".

Referências.

1. Recursos Hídricos. 2. Engenharia de Recursos Naturais. 3. Evapotranspiração. 4. Produtividade Primária Bruta. 5. Sensoriamento Remoto. 6. Caatinga. I. Santos, Carlos Antonio Costa dos. II. Título.

CDU 556.18(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM RECURSOS NATURAIS
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

Michele Laurentino de Oliveira

“ANÁLISE DA DINÂMICA DOS FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO EM DIFERENTES COBERTURAS DO SOLO NO NORDESTE BRASILEIRO”

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de Doutor(a) Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 27/02/2023

Dr.(a.) Carlos Antonio Costa dos Santos/UFCG (Orientador PPGEGRN).

Dr.(a.) Madson T. Silva/UFCG(Examinador Interno).

Dr.(a.) Sérgio Murilo S. de Araújo/UFCG(Examinador Interno).

Dr.(a.) John Elton de B.L. Cunha/UFCG (Examinador Externo).

Dr.(a.) Anderson L. Ruhoff/UFRGS(Examinador Externo).

Documento assinado digitalmente
gouby ANDERSON LUIS RUHOFF
Data: 28/02/2023 18:09:27-0300
Verifique em <https://verificador.br.br>



Documento assinado eletronicamente por CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 28/02/2023, às 09:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por SERGIO MURILO SANTOS DE ARAUJO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 28/02/2023, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por MADSON TAVARES SILVA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 28/02/2023, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 28/02/2023, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador 3125268 e o código CRC 33E40EE0.

RESUMO

As condições climáticas atrelada a pressão antrópica no Nordeste brasileiro - NEB, em especial o bioma Caatinga, predominante na maior parte da área de estudo, faz dessa região uma das mais vulneráveis do mundo. A falta de monitoramento eficaz e contínuo nessa região é um dos problemas que agrava a susceptibilidade à degradação do solo. Com base nisso, o presente trabalho tem como foco principal o monitoramento mais eficaz e contínuo dos fluxos de energia, água e carbono no bioma Caatinga em áreas que apresentam graus variados de degradação, buscando entender como a dinâmica desses fluxos se comportam devido alterações da cobertura do solo. Para isso, foram utilizados sensores de campo, instalados em áreas com cobertura vegetal contrastantes na Caatinga, que quantificaram esses fluxos no período de quatro anos (2013 - 2016), estudo abordado no Capítulo III. A fim de expandir nosso estudo, tanto temporalmente quanto espacialmente, utilizou-se técnicas de sensoriamento remoto de resolução moderada, os principais dados utilizados foram provenientes do sensor MODIS, em que estudos mostraram uma melhor precisão desses dados para a região do NEB. Com isso, o Capítulo IV tem como abordagem o monitoramento dos fluxos de água e carbono no NEB, a fim de investigar os padrões espaciais e temporais nos diversos biomas presentes na região. Os dados de campo gerados no Capítulo III, validaram os dados de sensoriamento remoto, sendo possível a utilização desses dados para uma análise mais ampla no Capítulo IV, em que foram comparadas as magnitudes e a sazonalidade da Evapotranspiração (ET) e Produtividade primária bruta (GPP - *Gross Primary Production*) entre os quatro biomas presentes no NEB (Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica) ao longo de 21 anos (2000 - 2020). A partir dos resultados foi possível quantificar o impacto real de áreas que sofreram perturbação. Diferenças consideráveis foram observadas no uso da água para produção e assimilação de carbono sobre áreas preservadas e degradadas da Caatinga. Áreas de Caatinga preservada (vegetação densa) conseguiram absorver até 2,5 vezes mais CO₂ do que áreas de Caatinga degradada (vegetação esparsa). Estudos como este apoiam a adoção de medidas contra desmatamento, incentivando tanto a preservação de áreas nativas quanto a recuperação de áreas degradadas. Além disso, mostra a importância de preservar o bioma Caatinga, dada a sua natureza de ser extremamente susceptível a disponibilidade hídrica em comparação com outros biomas.

Palavras-chave: Caatinga; sensoriamento remoto; evapotranspiração; produtividade primária bruta.

ABSTRACT

Climate conditions linked to anthropic pressure in the Brazilian Northeast (NEB), especially the Caatinga biome, with a predominance in most of the study area, make this region one of the most vulnerable in the world. The lack of effective and continuous monitoring in this region is one of the problems that aggravates this susceptibility to soil degradation. Based on this, the present study has as its main focus the more effective and continuous monitoring of energy, water, and carbon fluxes in the Caatinga biome in areas with varying degrees of degradation and seeking to understand how these flux dynamics behave due to land cover changes. For this, field sensors were installed in areas with contrasting vegetation cover in the Caatinga, which quantified these flows over a four-year period (2013 – 2016), a study discussed in Chapter II. In order to expand our study, both temporally and spatially, medium spatial resolution remote sensing techniques were used. The main data used came from the MODIS sensor, where some studies have shown better accuracy of these data for the NEB region. With this, Chapter III addresses the monitoring of water and carbon fluxes in the NEB to investigate spatial and temporal patterns in the various biomes present in the region. The field data generated in Chapter II validated the remote sensing data, making it possible to use these data for a broader analysis in Chapter III, where the magnitudes and seasonality of Evapotranspiration (ET) and Gross Primary Productivity (GPP) were compared among the four biomes present in the NEB (Amazon, Cerrado, Caatinga, and Atlantic Forest) over 21 years (2000 – 2020). From the results, it was possible to quantify the real impact of areas that suffered any disturbance. Considerable differences were observed in the use of water for carbon production and assimilation in preserved and degraded areas of the Caatinga. Areas of preserved Caatinga (dense vegetation) managed to absorb up to 2.5 times more CO₂ than areas of degraded Caatinga (sparse vegetation). Studies like this one support the adoption of measures against deforestation, encouraging both the preservation of native areas and the recovery of degraded areas. In addition, it shows the importance of preserving the Caatinga biome, given its nature of being extremely susceptible to water availability compared to other biomes.

Keywords: Caatinga; remote sensing; evapotranspiration; gross primary productivity.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CICLO RÁPIDO DO CARBONO	23
FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM RELAÇÃO AO BRASIL E PARAÍBA (LADO ESQUERDO), MAPA DE COBERTURA DO SOLO DO MUNICÍPIO DE CAMPINA GRANDE E LOCALIZAÇÃO DAS TORRES MICROMETEOROLÓGICAS.....	37
FIGURA 3 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO DO ESTUDO.	38
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS: (A) RADIAÇÃO INCIDENTE MÉDIA MENSAL (R_s) ($W m^{-2}$), (B) TEMPERATURA DO AR MÉDIA MENSAL (T_a) ($^{\circ}C$), (C) TEMPERATURA DO SOLO MÉDIA MENSAL (T_s) ($^{\circ}C$), (D) PRECIPITAÇÃO MENSAL (PPT) (MM) E EVI MENSAL, (E) DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR MÉDIO MENSAL (VPD) (KPA), (F) UMIDADE RELATIVA MÉDIA MENSAL (RH), (G) EVAPOTRANSPIRAÇÃO MENSAL (ET) (MM), PARA O PERÍODO DE JANEIRO DE 2013 A AGOSTO DE 2016 NAS DUAS ÁREAS DE CAATINGA (DC E SC). A ÁREA SOMBREADA INDICA A ESTAÇÃO CHUVOSA.....	44
FIGURA 5 - PRECIPITAÇÃO CUMULATIVA (PPT) (MM) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO CUMULATIVA (ET) (MM) PARA O PERÍODO ESTUDADO (2013, 2014, 2015 E 2016) PARA AS ÁREAS DC E SC.....	47
FIGURA 6 - VALORES MENSAIS DE PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA (GPP), RESPIRAÇÃO DO ECOSISTEMA (RECO) E TROCA LÍQUIDA DO ECOSISTEMA (NEE), TODOS OS FLUXOS EM $g C m^{-2}$ E DESVIO PADRÃO (SD) PARA A ÁREA DC (A, B E C) E A ÁREA SC (D, E E F).	49
FIGURA 7 - PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA ACUMULADA ANUAL (GPP), RESPIRAÇÃO DO ECOSISTEMA (RECO) E TROCA LÍQUIDA DO ECOSISTEMA (NEE) PARA O PERÍODO ESTUDADO (2013, 2014, 2015 E 2016) PARA ÁREA DE CAATINGA Densa (DC).	51
FIGURA 8 - PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA ACUMULADA ANUAL (GPP), RESPIRAÇÃO DO ECOSISTEMA (RECO) E TROCA LÍQUIDA DO ECOSISTEMA (NEE) PARA O PERÍODO ESTUDADO (2013, 2014, 2015 E 2016) PARA A ÁREA DE CAATINGA ESPARSA (SC).....	52
FIGURA 9 - EFICIÊNCIA MENSAL DO USO DA ÁGUA (WUE) ($g C kg^{-1} H_2O$) PARA DC (A) E SC (B) E ANUAL PARA AMBAS AS ÁREAS (C) DE 2013 A 2016, A ÁREA SOMBREADA REPRESENTA A ESTAÇÃO CHUVOSA.	54
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO DO ESTUDO,	65
FIGURA 11 - REGIÃO NORDESTE DO BRASIL (NEB) (A), BIOMAS DO NEB (B) E COBERTURA DO SOLO DAS ÁREAS DC E SC (C).....	67
FIGURA 12 - COMPARAÇÕES DE DADOS OBSERVADOS DIÁRIOS (EC) COM PRODUTOS MODIS: (A) MODIS ET PARA A ÁREA DC; (B) MODIS ET PARA A ÁREA SC; (C) MODIS GPP PARA A ÁREA DC; E (D) MODIS GPP PARA A ÁREA SC. A LINHA TRACEJADA É A LINHA DE TENDÊNCIA E A LINHA SÓLIDA É A REFERÊNCIA 1:1.....	71

FIGURA 13 - SÉRIES TEMPORAIS DE LONGO PRAZO DE ESTIMATIVAS DE PPT, ET E GPP DERIVADAS DE SR PARA AS DUAS ÁREAS (DC E SC): (A) PPT DERIVADA DO PRODUTO CHIRPS (2000 – 2020); (B) ET DERIVADA DO PRODUTO MOD16A2 (2001 – 2020); E (C) GPP DERIVADA DO PRODUTO MOD17A2H (2000 – 2020).	73
FIGURA 14 - SÉRIES TEMPORAIS DE ANOMALIAS ET (A) E GPP (B) PARA AS ÁREAS DC E SC, E SPEI 12 (C) PARA O PERÍODO 2000 - 2020.	74
FIGURA 15 - MATRIZES DE CORRELAÇÃO DAS VARIÁVEIS PPT, SPEI, ET E GPP PARA: (A) ÁREA DE VEGETAÇÃO DENSA (DC) E (B) ÁREA DE VEGETAÇÃO ESPARSA (SC) DO BIOMA CAATINGA.	75
FIGURA 16 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL PARA O NEB (2000 – 2020) COM BASE NAS ESTIMATIVAS DO CHIRPS.	76
FIGURA 17 - MAPAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÉDIA ANUAL (ET) DERIVADOS DO PRODUTO MOD16A2 (2001 – 2020) PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.	77
FIGURA 18 - MAPAS DE PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA MÉDIA ANUAL (GPP) DERIVADOS DO PRODUTO MOD17A2H (2000 – 2020) PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.	78
FIGURA 19 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO ANUAL (ET) (MÉDIA POR BIOMAS) PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.	79
FIGURA 20 - PRODUÇÃO PRIMÁRIA BRUTA ANUAL (GPP) (MÉDIA POR BIOMAS) PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL.	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. RESUMO DOS SATÉLITES TERRA E AQUA.	29
TABELA 2 - MÉDIAS ANUAIS E CUMULATIVAS DE DIFERENTES VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS E BIOFÍSICAS PARA AS DUAS ÁREAS DE CAATINGA (DC E SC) (RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE MÉDIA DIÁRIA (R_s) ($W m^{-2}$), TEMPERATURA DO AR MÉDIA DIÁRIA (T_a) ($^{\circ}C$), TEMPERATURA DO SOLO MÉDIA DIÁRIA (T_s) ($^{\circ}C$), PRECIPITAÇÃO ANUAL CUMULATIVA (PPT) (MM), EVI MÉDIO DIÁRIO, DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR MÉDIO DIÁRIO (VPD) (KPA), UMIDADE RELATIVA MÉDIA DIÁRIA (RH), EVAPOTRANSPIRAÇÃO CUMULATIVA ANUAL (ET) (MM), PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA CUMULATIVA ANUAL (GPP) ($G C m^{-2}$), RESPIRAÇÃO DO ECOSISTEMA CUMULATIVA ANUAL (R_{eco}) ($G C m^{-2}$) E TROCA LÍQUIDA DO ECOSISTEMA CUMULATIVA ANUAL (NEE) ($G C m^{-2}$)). ANÁLISE ANUAL, ESTAÇÕES SECA E CHUVOSA (2013 – 2016).....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPLUT - *Biome Property Lookup Tables*
CHIRPS - *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*
DC - *Dense Caatinga*
EC - *Eddy Covariance*
ET - *Evapotranspiração*
EVI - *Enhanced Vegetation Index*
fAPAR - *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*
GEE - *Google Earth Engine*
GMAO - *Global Modeling and Assimilation Office*
GPP - *Gross Primary Production*
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
INSA - Instituto Nacional do Semiárido
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
ITCZ - *Intertropical Convergence Zone*
LAI - *Leaf Area Index*
MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
NEB - *Nordeste brasileiro*
NEE - *Net Ecosystem Exchange*
PET - *Evapotranspiração Potencial*
PPT - *Precipitação*
R_{eco} - *Respiração do Ecossistema*
RH - *Relative Humidity*
R_s - *Radiação incidente*
SC - *Sparse Caatinga*
SDTF - *Seasonally Dry Tropical Forest*
SEEG – *Sistema de Estimativa de Emissão de Gases*
SPEI - *Standardized precipitation evapotranspiration index*
SR - *Sensoriamento Remoto*
T_a - *Temperatura do ar*
T_s - *Temperatura do solo a 2 cm de profundidade*
VPD - *Vapor Pressure Deficit*

WUE - *Water-Use Efficiency*

λE - Fluxo de calor latente

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	HIPÓTESES.....	16
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
2	CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	18
2.1.1	<i>Bioma Caatinga</i>	19
2.2	FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO	20
2.2.1	<i>Evapotranspiração</i>	21
2.2.2	<i>Ciclo do carbono</i>	22
2.3	MENSURAÇÃO DOS FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CO ₂	26
2.3.1	<i>Método de correlações turbulentas (EC)</i>	27
2.3.2	<i>Sensoriamento remoto - MODIS</i>	28
3	CAPÍTULO III - EFEITOS DA DEGRADAÇÃO DO SOLO INDUZIDA PELO HOMEM NOS FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO EM DUAS DIFERENTES COBERTURAS DE SOLO DE SEQUEIRO BRASILEIRO.....	32
3.1	INTRODUÇÃO.....	33
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.2.1	<i>Área de estudo</i>	36
3.2.2	<i>Dados</i>	38
3.2.3	<i>Processamento e Análise dos Dados</i>	39
3.3	RESULTADOS	41
3.3.1	<i>Condições Meteorológicas</i>	41
3.3.2	<i>Evapotranspiração total anual</i>	46
3.3.3	<i>Fluxos de carbono</i>	48
3.3.4	<i>Eficiência do uso da água (WUE)</i>	53
3.4	DISCUSSÃO.....	55
3.5	CONCLUSÕES.....	59

4	CAPÍTULO IV - AVALIAÇÃO BASEADA EM SENSORIAMENTO REMOTO DA DEGRADAÇÃO DO SOLO E IMPACTOS DA SECA SOBRE OS ECOSISTEMAS TERRESTRES NO NORDESTE DO BRASIL.....	61
4.1	INTRODUÇÃO	62
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	65
4.2.1	Área de estudo	65
4.2.2	Dados micrometeorológicos.....	67
4.2.3	Dados de sensoriamento remoto orbital	68
4.2.4	Análise de dados.....	69
4.3	RESULTADOS	70
4.3.1	Validação dos produtos MODIS ET (MOD16A2) e MODIS GPP (MOD17A2H) para áreas do bioma Caatinga.....	70
4.3.2	Análises de longo prazo da PPT, ET e GPP nas áreas DC e SC.....	71
4.3.3	Análises de anomalias entre as variáveis ET, GPP e SPEI para as áreas DC e SC	73
4.3.4	Análises de correlação das variáveis PPT, SPEI, ET e GPP nas áreas DC e SC do bioma Caatinga	74
4.3.5	Análises espaço-temporais da ET e GPP para o NEB.....	75
4.3.6	ET e GPP por biomas no NEB	79
4.4	DISCUSSÃO	80
4.4.1	Validação.....	80
4.4.2	Análises temporais no bioma Caatinga.....	81
4.4.3	Análises espaço-temporais no NEB.....	82
4.5	CONCLUSÕES	84
5	CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES GERAIS.....	85
	REFERÊNCIAS	86

1 CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL

As trocas de energia, água e carbono entre a superfície terrestre e a atmosfera são os principais impulsionadores do sistema climático da Terra em escala local, regional e global (YUE et al., 2019). A quantificação dos fluxos envolvendo as trocas de água e carbono permite uma melhor compreensão da sobrevivência e adequação das plantas, fornecendo subsídio para o desenvolvimento de modelos preditivos (KOHONEN et al., 2022). O estudo ao longo prazo desses fluxos em ecossistemas específicos permite aos pesquisadores compreender diferentes padrões de vegetação, determinados por condições ambientais, como clima, solo e manejo agrícola (RAHMAN e ROBSON, 2020).

Os processos que envolvem mudanças na cobertura do solo podem afetar o clima, pois a atmosfera é influenciada pelas características da superfície, afetando as trocas de energia, água e carbono (SOUZA e OYAMA, 2011; MARIANO et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2018; YANG et al., 2019). A evapotranspiração (ET) e a produção primária bruta (GPP - *Gross Primary Production*) são variáveis críticas, pois representam processos diretamente ligados à cobertura da superfície. A ET é necessária para entender a dinâmica dos processos hidrológicos e é essencial para a gestão da água, principalmente em regiões de clima semiárido (LIMA et al., 2021). Semelhantemente, a GPP é o principal regulador da troca de carbono da atmosfera para a superfície, no entanto, estimar a GPP em escala regional ainda é um desafio operacional (LIU et al., 2020).

Estimativas dos fluxos de água e carbono têm sido obtidas em diversas regiões por meio de sensores de campo e sensores orbitais, a junção desses métodos tem permitido estimativas mais precisas, se tornando essencial para diversas aplicações na gestão de recursos hídricos e mudanças climáticas. O presente trabalho utilizou dados oriundos de sensores instalados em torres micrometeorológicas, necessários para a aplicação do método *Eddy Covariance* (EC), e dados de sensoriamento remoto orbital obtidos do sensor MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, a fim de mapear as estimativas desses fluxos nos diferentes biomas presentes no Nordeste brasileiro (NEB), com o objetivo de avaliar as mudanças na cobertura do solo e seus impactos nos ciclos de água e carbono.

O NEB apresenta alta variabilidade climática, de superfície (vegetação) e socioeconômica. A sua extensão territorial é dividida em sub-regiões (Meio-Norte, Agreste, Sertão e Zona da Mata), abrangendo o litoral (Zona da Mata) e uma grande parcela composta

pela região semiárida (polígono das secas). A obtenção de informações precisas sobre os fluxos de água e carbono em regiões semiáridas é essencial, pois, além de sua extensão em torno de 11,5% do território brasileiro, onde originalmente o bioma Caatinga compunha ~ 76% dessa área, possuem características únicas em relação a outros ecossistemas (BORGES et al., 2020).

Essas áreas são caracterizadas por alta irregularidade das chuvas, temperaturas e radiação solar elevadas, que aumentam a evaporação e a dessecação do solo, levando a déficits hídricos durante a maior parte do ano (MUTTI et al., 2019). Como pode ser visto, a estimativa da perda de água torna-se de grande relevância no auxílio à tomada de decisão dos órgãos governamentais. Além disso, a degradação ambiental afeta potencialmente os fluxos de água e carbono (MENDES et al., 2021). Monitorar e detectar áreas propensas à degradação ambiental é apenas o primeiro passo para fornecer informações valiosas aos tomadores de decisão para mitigar efeitos e prevenir desastres climáticos, estabelecendo políticas de exploração e ocupação do solo (MARIANO et al., 2018).

No contexto da Caatinga, ainda existe um desconhecimento sobre os fluxos turbulentos de superfície, permanecendo um desafio entender como as variáveis meteorológicas e ambientais influenciam os fluxos de energia e massa na interface biosfera-atmosfera, principalmente em casos de supressão da cobertura vegetal nativa e as consequentes alterações no microclima (BORGES et al., 2020). Além disso, embora a Caatinga seja um bioma brasileiro endêmico com expressiva heterogeneidade vegetal, são poucos os estudos que avaliam e validam conjuntos de dados MODIS (FERREIRA et al., 2021).

As áreas mais populosas da Caatinga sofrem enorme pressão antrópica, se tornando áreas vulneráveis à desertificação e perda da biodiversidade devido à extensa conversão de terras para agricultura e pastagem (ERASMI et al., 2014). A pressão antrópica sobre os recursos naturais leva à deterioração ambiental, gerando um ciclo de pobreza e miséria, tornando a região cada vez mais vulnerável (SILVEIRA et al., 2018). Um melhor entendimento do papel da Caatinga no microclima global, atrelado aos aspectos sociais e econômicos, ajudará na conscientização perante a preservação ambiental dessas áreas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O monitoramento da Caatinga é bastante complexo devido a sua diversidade biótica e sensibilidade às variações climáticas. É interessante compreender a influência dessa região (que está sempre em processo de renovação) no ciclo do carbono, analisando aspectos ambientais, econômicos e sociais.

Apesar do número crescente de estudos de biodiversidade (LEAL et al., 2005; ALBUQUERQUE et al., 2012; MORO et al., 2014; SANTOS et al., 2014; BFG, 2015), poucos estudos em multiescalas sobre os impactos do uso do solo estão disponíveis, principalmente quando se trata de Floresta Tropical Sazonalmente Seca (SDTF - *Seasonally Dry Tropical Forest*) (SCHULZ et al., 2017). Na América do Sul, grande parte dos esforços para estimativas de mudanças na cobertura vegetal e microclima local tem se concentrado em florestas tropicais, dando menor atenção às regiões secas e sazonais (PENNINGTON et al., 2006; PORTILLO-QUINTERO e SANCHEZ-AZOFEIFA, 2010; SANTOS et al., 2011).

O estudo de áreas que apresentam diferentes graus de degradação pode nos ajudar na compreensão do seu papel nas trocas de calor e massa em diferentes estágios e, entender como uma região afetada por fatores climáticos e antrópicos (degradação do solo), e como esses fatores podem impactar o microclima e agir inibindo o processo de desertificação (GUSMÃO et al., 2016). Sousa et al. (2007) disserta que as terras agrícolas estão comprometidas pelo desmatamento e pela manutenção de uma atividade pecuária acima da capacidade de suporte da Caatinga. Tais práticas são responsáveis pelo aparecimento das erosões, que desencadeiam o processo de desertificação em estágio severo, como os núcleos de desertificação. Com isso se torna ainda mais importante a exploração desse bioma, que é um dos mais vulneráveis e susceptíveis a desertificação (CUNHA et al., 2013).

Além disso, nos últimos anos, o Brasil aumentou suas emissões de gases de efeito estufa devido, especialmente, ao aumento significativo no desmatamento. Cerca de 49% das emissões em 2021 estavam associadas à mudança de uso do solo (SEEG, 2022). Assim, reforça a importância de estudos como este, como incentivo a políticas públicas voltadas à conservação, uso sustentável e bioprospecção do bioma e oferecendo suporte para o gerenciamento e elaboração de políticas de adaptação.

1.2 HIPÓTESES

Diante do que foi exposto, este trabalho procurará dar respostas às seguintes questões: 1) Os produtos GPP e ET gerados pelo sensor MODIS conseguem representar bem a dinâmica espacial dessas variáveis ambientais no bioma Caatinga? 2) O bioma Caatinga funciona como sumidouro ou fonte de CO₂? 3) Qual o comportamento dos fluxos de água e carbono em toda a região do Nordeste brasileiro, e em diferentes densidades de cobertura vegetal? 4) Qual área ocorreu maior variação da ET e GPP e suas causas? (Série temporal: 2000 - 2020).

A hipótese formulada neste trabalho é que é possível quantificar os fluxos de água e carbono através dos produtos MODIS para o bioma Caatinga, para isso os dados obtidos por sensoriamento remoto passaram por validação através de sensores de campo instalados em pontos estratégicos da Caatinga. Esses sensores de campo serviram para quantificar os fluxos de água e carbono, auxiliando para uma melhor compreensão das interações dos fluxos de energia, água e carbono. A partir da estimativa desses fluxos, foi possível compreender a variação dos mesmos em diferentes níveis de cobertura vegetal na Caatinga: áreas em processo de regeneração e áreas degradadas, além dos diferentes biomas presentes no NEB (Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a dinâmica dos fluxos de água e carbono e quantificar a absorção de CO₂ em diferentes tipos de cobertura do solo no NEB.

1.3.2 Objetivos específicos

- Validar os dados de sensoriamento remoto (produtos MODIS), a partir dos dados obtidos pelos sensores de campo;
- Analisar a influência dos fatores biofísicos nos ciclos de água e carbono;
- Investigar como os fluxos de água e carbono mudam devido a degradação;
- Identificar se a região desempenha o papel de sumidouro de CO₂;
- Avaliar os padrões espaço-temporais da eficiência do uso da água (WUE - *Water-Use Efficiency*) na Caatinga;
- Analisar os fluxos de água e carbono nos diferentes biomas do Nordeste brasileiro.

2 CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

No Brasil, as terras secas concentram-se principalmente na região nordeste, com uma área de cerca de 1.542.000 km², representando 18,26% do território brasileiro. Inclui os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia (MARENGO E BEMASCONI, 2015), sua extensão territorial é dividida em sub-regiões (Meio-Norte, Agreste, Sertão e Zona da Mata), abrangendo o litoral (Zona da Mata) e uma grande parcela composta pela região semiárida, afetada regularmente por secas, referido como Polígono das Secas (DINIZ, 2016).

É considerada a maior ecorregião semiárida da América do Sul (MORO et al., 2014), abrangendo cerca de 980.000 km², o que corresponde a aproximadamente 13% do território brasileiro (IBGE, 2015). A delimitação dessa região definidos pelo governo brasileiro (BRASIL – MIN 2005) foi baseada na precipitação (média anual abaixo de 800 mm), índice de aridez de até 0,5 e risco de seca acima de 60% em relação a climatologia 1970 – 1990. Uma população com mais de 20 milhões de pessoas vivem nessa região tornando-a uma das regiões semiáridas mais densamente povoadas do mundo (MENESES et al., 2012).

A região semiárida do Brasil apresenta particulares condições climatológicas, como baixas e irregulares chuvas concentradas em alguns meses do ano, altas temperaturas e radiação solar incidente, gerando alta evaporação e secura do solo, levando a maiores déficits hídricos na maior parte do ano (MEDEIROS et al., 2012; MARQUES et al., 2020). A ocorrência de períodos alternados de longas secas e chuvas intensas, impacta diretamente a disponibilidade de água, afetando o abastecimento humano de água, o desenvolvimento da agricultura e o fornecimento de serviços de ecossistema (MUTTI et al., 2019).

A região apresenta uma vegetação xeromórfica composta prioritariamente por arbustos que perdem as folhas nos meses mais secos ou por pastagens que secam na época de estiagem, características do bioma caatinga.

2.1.1 Bioma Caatinga

A Caatinga ocupa 844.453 km², o equivalente a 11% do território brasileiro, e compreende quase a totalidade dos 980.00 km² da região do Semiárido (GUSMÃO et al., 2016). Porém cerca de 46% dessa área está desmatada (GIONGO et al., 2011). É um bioma heterogêneo consistindo de um mosaico de arbustos e áreas de floresta sazonalmente seca (SDTF) (LEAL et al., 2005; SANTOS et al., 2011), representada por diferentes tipos de formas fisionômicas, denominados localmente como arbustivo, lenhoso e arbustivo/arborizado (ARAÚJO et al., 2007).

A vegetação do bioma Caatinga está ligada diretamente as condições hídricas da região, passando por transformações significativas em um curto espaço de tempo (de acordo com a disponibilidade hídrica). A paisagem mais comum é dominada por árvores baixas, frequentemente com espinhos e folhas diminutas, além de plantas suculentas, como cactos e eufórbias. Muitas plantas perdem as folhas na estação seca e apresentam floração intensa e rápida no início da estação chuvosa (GUSMÃO et al., 2016).

É um dos biomas mais vulneráveis a quaisquer mudanças significativas na duração e intensidade das secas (SEDDON et al., 2016). A variabilidade climática é tradicionalmente alta nesta região, registros mostram que mesmo sob normas históricas, frequentemente experimentam secas de mais de 11 meses (AB'SABER, 1977). Essa extrema variabilidade é provavelmente causada por uma combinação de padrões regionais de circulação térmica (MOURA e SHUKLA, 1981) e anomalias da temperatura da superfície do mar (ROUCOU et al., 1996, PEREIRA et al., 2014).

As chuvas são escassas e irregulares, concentradas em três a seis meses por ano, com médias anuais entre 250 mm e 800 mm. As temperaturas são altas, com média anual de 27 °C. Muitas áreas ficam seis meses ou mais sem chuvas, além de concentradas em curto período, a distribuição das chuvas é muito irregular, podendo não chover durante todo um ano, especialmente quando ocorre o fenômeno conhecido como *El Niño* (GUSMÃO et al., 2016).

A Caatinga sofre fortes pressões antropogênicas, como consequência da ocupação do espaço por homem e exploração dos recursos naturais, apresentando vários graus de perturbação (MMA 2010 - Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento da Caatinga). As causas dos processos de degradação estão associadas ao manejo inadequado para explorar seus recursos físicos e biológicos, como extração excessiva de madeira, má gestão das

áreas de pastagem, más práticas de irrigação, sistemas inadequados de uso do solo e gestão (MAINGUET e SILVA, 1998; CAVALCANTI e COUTINHO, 2005).

Altos níveis de degradação do habitat e perturbação associada de processos ecológicos aumentam ainda mais a vulnerabilidade do bioma para futuros extremos climáticos (LEAL et al., 2015). Sendo o bioma Caatinga um dos mais ameaçados do Brasil devido ao desmatamento generalizado para a agricultura e extração mineral (LEAL et al., 2005, PRADO 2003, MMA 2015). O estudo desse bioma busca entender a resposta da vegetação e os impactos climáticos em relação a esses eventos.

2.2 FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO

Mudanças no sistema climático da Terra são consideradas processos naturais em escala de tempo geológico (SPIELHAGEN, 2012). Entretanto, a velocidade e intensidade com as quais essas mudanças estão ocorrendo, especialmente quando somadas as várias ações antrópicas danosas ao planeta, têm sido objetos de preocupação nos domínios da ciência e política mundiais (KOEHLER et al., 2002, GALVÍNCIO et al., 2011).

A escassez de água é uma característica comum em regiões áridas e semiáridas, onde anos muito chuvosos são raros (HAVERD et al., 2017; HUXMAN et al., 2004; LOIK et al., 2004). O tempo e a quantidade de chuva são as principais limitação de recursos para a produtividade do ecossistema em regiões semiáridas. A precipitação e a temperatura são altamente variáveis ao longo dos anos, explicando muito da variação interanual nos fluxos de água (CHEN et al., 2013) e carbono (AHLSTRÖM et al., 2015; HAVERD et al., 2017; SCHLESINGER, 2017).

Diferenças no tempo de pico de chuva e de índice de área foliar (LAI) contribui para diferenças no tempo, magnitude e comportamento da ET e produção líquida do ecossistema (NEE) (RICHARDSON et al., 2013). Efeitos de eventos extremos anteriores e a variabilidade interanual da precipitação pode desempenhar papéis importantes na determinação de fluxos de água e carbono durante os anos subsequentes (CHEN et al., 2013; CLEVERLY et al., 2016b; FRANK et al., 2015; REICHSTEIN et al., 2013).

A ET e GPP são dois dos principais índices de fluxo em um sistema de bacia (LIU et al., 2020). Juntamente com o processo da ET, a fotossíntese da vegetação, ou seja, a GPP é uma componente principal dos ciclos globais de carbono (ZHANG et al., 2016). A taxa de

transferência de CO₂ da atmosfera para os locais de carboxilação durante o processo de fotossíntese está intimamente relacionado à água perdida na atmosfera através da transpiração foliar. Essas trocas são controladas pela interação de vários fatores ambientais e biológicos (SCOTT et al., 2006; ZHANG et al., 2011).

Espera-se que fluxos e estados eco-hidrológicos tenham várias tendências em diferentes períodos de tempo, atribuídas principalmente a variabilidade no sistema climático e nas atividades humanas (XING et al., 2014). Um grande número de estudos focou as variações e atribuições da ET e GPP em diferentes regiões (GAO et al., 2012; MATIN e BOURQUE, 2013; SUN e REN, 2013; MO et al., 2014; MEKONNEN et al., 2016; ZHOU et al., 2016; CHEN et al., 2017; MA et al., 2018; YAO et al., 2018).

2.2.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração representa o conjunto das ações de perda de água causada pela evaporação a partir da superfície do solo e dos cursos d'água, lagos, mares e no interior das plantas (transpiração) (TUCCI, 2001). É um processo vital no ciclo de águas superficiais (KRAMER e KOZLOWSKI, 1979; SHUKLA e MINTZ, 1982; JUNG et al., 2010). A transpiração é a evaporação da água para a atmosfera, decorrente de ações fisiológicas das plantas, em um processo envolve a retirada da água do solo através das raízes das plantas e a transmissão à atmosfera pela transpiração das folhas, através das cavidades estomáticas. A evapotranspiração somente poderá ocorrer naturalmente se houver a disponibilidade de energia no sistema, proveniente do sol, da atmosfera, ou de ambos (TUCCI, 2001).

O termo evapotranspiração foi proposto por THORNTHWAITE (1944) para representar ambos os processos, evaporação e transpiração, que ocorrem de maneira natural e simultânea em uma superfície vegetada (PEREIRA et al., 2002).

A ET representa o fluxo total de água e inclui a transpiração das plantas e a evaporação do solo e dosséis úmidos (perdas por interceptação), transpiração representa um custo inerente de assimilação de CO₂ (através dos estômatos) (MARQUES et al., 2020). No nível da planta, o controle fisiológico da absorção de CO₂ e a transpiração é realizada pelos estômatos e a modulação de tais processos é quantificado em termos de condutância estomática foliar (*G_s*) (FANOURAKIS et al., 2013; LIN et al., 2015; WEHR et al., 2017). No ecossistema, o controle

da ET e a absorção do CO₂ é quantificada em termos de condutância da superfície e sua relação com fatores ambientais e biológicos.

A análise quantitativa da evapotranspiração pode ser aplicada na resolução de problemas relacionados à gestão dos recursos hídricos em geral, ao manejo da água, agricultura, variações climáticas e previsão de cheias. (OLIVEIRA, 2018). Com isso, é necessário mais esforço para compreender melhor os controles ambientais e biofísicos da ET e de que maneira eles afetam a transferência de calor e massa na Caatinga. (MARQUES et al., 2020).

Os princípios físicos ligados ao fenômeno da evapotranspiração são relativamente complexos e variáveis no tempo e no espaço. Apesar dessa complexidade, vários métodos foram desenvolvidos para estimar a ET. Essa estimativa pode ser feita de diferentes maneiras: lisímetro, métodos das correlações turbulentas, cintilometria, método do balanço de energia baseado na Razão de Bowen, método aerodinâmico, balanço hídrico no solo, sensoriamento remoto dentre outros (OLIVEIRA, 2018).

A possibilidade de integrar as diferentes técnicas de estimativa da evapotranspiração permite uma melhor compreensão da influência dos diversos fatores físicos relacionados à sua mensuração. Entre os principais problemas relatados na literatura sobre a estimativa da evapotranspiração, estão as condições de advecção, que estão intrinsecamente ligadas à escala de mensuração (OLIVEIRA, 2018).

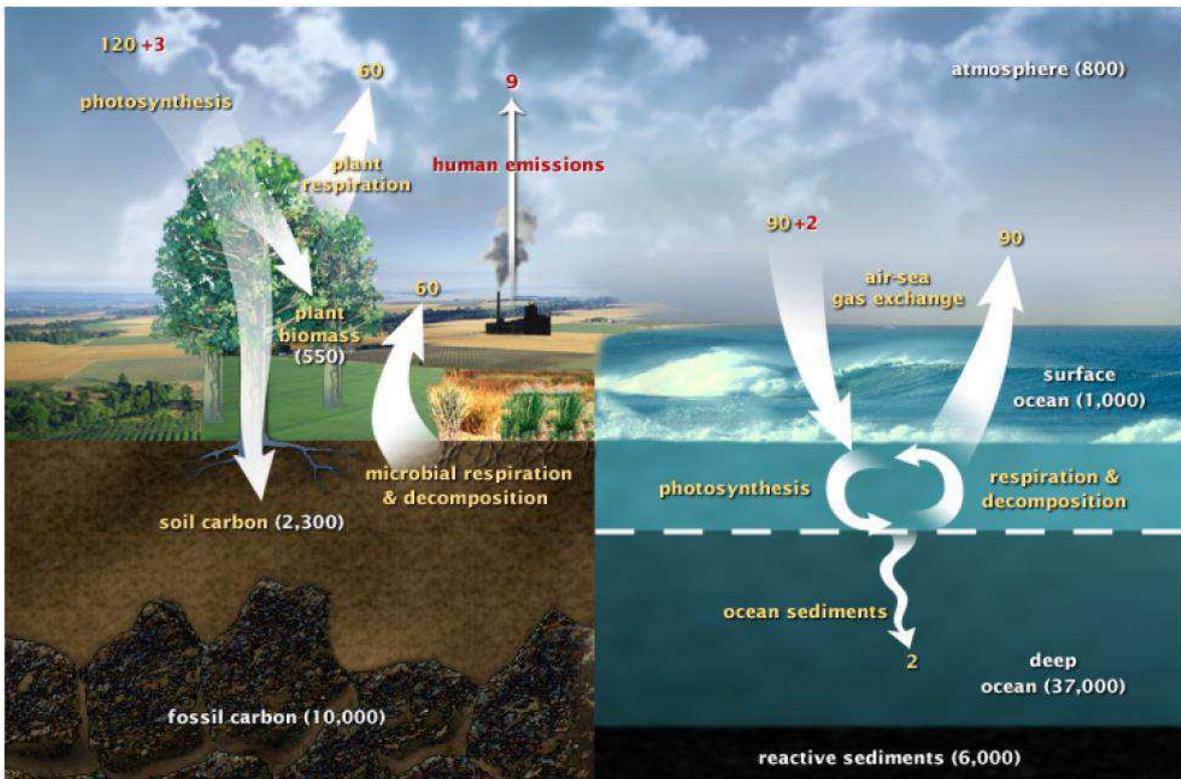
Dependendo da heterogeneidade da paisagem, parâmetros ambientais podem variar substancialmente em escalas espaciais e temporais (ALLEN et al., 2011; RAMOELO et al., 2014; AGUILAR et al., 2018), o uso do sensoriamento remoto surge como ferramenta para extrapolar espacialmente essas quantificações, através de modelos baseados em trocas de calor e massa (SANTOS et al., 2019). Com o auxílio de informações de sensoriamento remoto, o fluxo pode ser ampliado de escala local a regional com o método de balanço de energia de superfície, como o *Surface Energy Balance System* (SEBS) (ALLEN et al., 2007) e o algoritmo Penman-Monteith (PM) (LEUNING et al., 2008; SONG et al., 2017; YANG et al., 2018). Entre estes métodos, algoritmos baseados em PM são de confiabilidade fisiológica, introduzindo resistência aerodinâmica e de superfície (SONG et al., 2017; MU et al., 2011).

2.2.2 Ciclo do carbono

O carbono é a espinha dorsal da vida na Terra. Somos feitos de carbono, comemos carbono e nossas civilizações (nossas economias, nossas casas, nossos meios de transporte) são construídas sobre carbono. Precisamos de carbono, mas essa necessidade também está entrelaçada com um dos problemas mais sérios que enfrentamos hoje: as mudanças climáticas globais (RIEBEEK e SIMMON, 2011).

A maior parte do carbono da Terra - cerca de 65,5 bilhões de toneladas - é armazenada em rochas. O resto está no oceano, atmosfera, plantas, solo e combustíveis fósseis. O carbono flui entre cada reservatório em uma troca chamada ciclo do carbono, que possui componentes lentos e rápidos. Qualquer mudança no ciclo que retira o carbono de um reservatório coloca mais carbono nos outros reservatórios. Mudanças que colocam gases de carbono na atmosfera resultam em temperaturas mais quentes na Terra (RIEBEEK e SIMMON, 2011). A Figura 1 mostra o ciclo rápido do carbono, o movimento do carbono entre a terra a atmosfera e os oceanos.

Figura 1. Ciclo rápido do carbono.



Adaptado do DOE dos EUA, Sistema de informações de Pesquisa Biológica e Ambiental). Fonte: Riebeek e Simmon, 2011.

Os números amarelos indicam os fluxos naturais, os vermelhos as contribuições humanas em gigatoneladas de carbono por ano, os números brancos indicam carbono armazenado.

As mudanças no ciclo do carbono têm como principal causa a ação antrópica, a queima de combustíveis fósseis e a mudança na cobertura do solo interferem no ciclo do carbono. A limpeza de uma área florestada, remove um crescimento denso de plantas que armazenavam carbono em madeira, caules e folhas (biomassa). A tendência é a substituição do crescimento denso por culturas ou pastagens, que armazenam menos carbono. Atualmente, os seres humanos estão emitindo pouco menos de um bilhão de toneladas de carbono na atmosfera por ano através de mudanças no uso do solo (RIEBEEK e SIMMON, 2011).

As mudanças no ciclo do carbono afetam cada reservatório. Concentrações crescentes de dióxido de carbono estão aquecendo a atmosfera. O aumento da temperatura resulta em taxas de evaporação mais altas e uma atmosfera mais úmida, o que leva a um ciclo vicioso de aquecimento adicional. O excesso de carbono na atmosfera aquece o planeta e ajuda no desenvolvimento das plantas (se não ocorrer nenhum déficit de suprimento), com o crescimento das plantas conseqüentemente ocorrerá uma maior demanda de água e nutrientes, afetando assim outros ciclos. O excesso de carbono no oceano torna a água mais ácida, colocando em risco a vida marinha (RIEBEEK e SIMMON, 2011).

2.2.2.1 Fluxos de carbono no semiárido

Os fluxos de carbono são de grande importância ao se tratar do ciclo de carbono, em particular no que diz respeito à mudança de uso do solo, e se tratando de ecossistema, são fortemente regulados pela cobertura vegetal, de modo que a mudança do uso do solo e o manejo da agricultura afetam diretamente a dinâmica dos fluxos (FLEISCHER et al., 2016). A intensidade dos fluxos de CO₂ dos ecossistemas terrestres depende tanto da cobertura vegetal como do estado fisiológico da vegetação (RAHMAN et al., 2001), e varia de um bioma para outro, dependendo das suas características, onde normalmente, os maiores fluxos esperam-se encontrar nas florestas tropicais úmidas (AGUIAR et al., 2006).

Em ambientes semiáridos, os maiores fluxos de carbono têm uma relação com atividades antrópicas, como exemplo, a prática de derrubada e queima da Caatinga para a formação de roçados e pastos, e da regeneração da vegetação nativa em áreas nas quais essas práticas de manejo deixaram de ser desenvolvidas (SAMPAIO e COSTA, 2011). Além da ação

antrópica, a região semiárida sofre com as condições climáticas, o que favorece a mudança na cobertura vegetal. Mesmo pequenas variações na precipitação nessas regiões podem levar a mudanças na vegetação (GOLDBLATT et al., 2017). Em estado estacionário, a vegetação nas regiões semiáridas do mundo é o principal impulsionador do ciclo sazonal do carbono. Essas regiões costumam ter um percentual maior de água precipitável da vegetação, estando mais fortemente acoplados do que em outros ecossistemas (KOSTER et al., 2004; SEDDON et al., 2016).

Com relação aos estoques de carbono na vegetação da Caatinga, SAMPAIO e COSTA (2011) afirmam que áreas cobertas por vegetação nativa de Caatinga arbustiva e arbórea possui um estoque de biomassa maior em relação as áreas cobertas com vegetação herbácea, como exemplo, pastagens abertas, e maior que as áreas plantadas com culturas de ciclo curto.

2.2.2.2 Balanço do carbono

O sistema solo-planta é o grande responsável pela absorção e estocagem do CO_2 , sendo de grande importância para o balanceamento e equilíbrio deste elemento para a atmosfera. As plantas tanto fixam como emitem gás CO_2 , ocorrendo a emissão através da morte e decomposição de florestas mortas ou a combustão desse material. Ao ocorrer a fixação do CO_2 , a floresta exerce a função de “sumidouro” e quando está ocorrendo a emissão a mesma age como “fonte” (SILVA, 2013). No período noturno, a planta emite gás carbono para a atmosfera, devido ao processo de respiração, entretanto no período diurno a planta absorve o CO_2 para realização da fotossíntese. Durante a fotossíntese, as plantas absorvem CO_2 e luz solar para criar combustível (glicose e outros açúcares) para a construção das estruturas das plantas. Esse processo forma a base do ciclo rápido (biológico) do carbono (RIEBEEK e SIMMON, 2011).

As variáveis chaves no ciclo do carbono e da água são a produtividade primária líquida (NPP, em inglês) e a evapotranspiração (ET). O balanço de carbono consiste de vários processos importantes que descrevem as trocas de CO_2 entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Produtividade primária bruta (GPP) é o total de carbono assimilado pela vegetação. Uma fração de GPP é perdida para a atmosfera como resultado da respiração autotrófica (RA). A NPP é o balanço entre GPP e RA, é alocada para folhas, madeira, raízes, tecidos reprodutivos, armazenamento, etc. NPP, a medida direta da produtividade da vegetação, tem sido medida a partir de levantamento de campo sobre biomassa há décadas e tem o maior banco de dados histórico. NPP se relaciona diretamente à floresta, o alcance e a produtividade das culturas, e

assim também tem um valor sócio-econômico elevado. A produção líquida do ecossistema (NEE), que é a troca líquida de CO₂ entre ecossistemas terrestres e a atmosfera, é medida por torres de fluxo. NEE tem alta relevância científica para o balanço de carbono terrestre e produção de gases de efeito estufa, mas menos significância socioeconômica direta (RUNNING et al., 1999).

A NEE é uma medida da acumulação de carbono por um ecossistema. NEE é positivo quando a GPP excede a respiração do ecossistema (Reco) e correspondentemente negativo quando a perda respiratória excede a GPP (CHAPIN et al., 2006). Em ecossistemas terrestres NEE (= GPP - Reco) indica se um ecossistema é uma fonte ou sumidouro de CO₂ atmosférico, com valores positivos representando um sumidouro de carbono (GPP > Reco) e valores negativos uma fonte de carbono (GPP < Reco) (TARIN et al., 2020).

2.3 MENSURAÇÃO DOS FLUXOS DE ENERGIA, ÁGUA E CO₂

Os princípios físicos ligados aos fluxos de água e CO₂ são relativamente complexos e variáveis no tempo e espaço, devido a heterogeneidade do comportamento de alguns parâmetros que influenciam nesses, tais como, precipitação, radiação solar, fluxo de nutrientes, topografia, características do solo, características do ecossistema (por exemplo, índice da área foliar e idade) (ROCHA, 2018), apesar dessa complexidade, vários métodos foram desenvolvidos para estimar a ET citados na seção 2.2.1. A compreensão da dinâmica dos fluxos de água e CO₂ evoluiu bastante nas últimas décadas com a ampliação da utilização da técnica de EC (ROCHA, 2018), técnica utilizada no referido trabalho.

Devido a variação desses fluxos ao longo do tempo e espaço, é recomendada a realização de pesquisas com séries temporais mais longas (AGUIAR et al., 2006). O método EC pode medir de maneira contínua e confiável as trocas líquidas de água e carbono entre a atmosfera e ecossistemas terrestres nas escalas diurna, sazonal e anual (BALDOCCHI et al., 2001; WANG et al., 2011), no entanto a área de abrangência do EC é limitada (normalmente variando de centenas de metros a 1 km) e curtos períodos de tempo (BELSHE et al., 2012; MALHI, 2012).

A integração de medições de sensores de campo (EC) com sensoriamento remoto (SR), surge como alternativa para fornecer soluções rápidas, contínuas, medição sistemática e repetitiva da estrutura da vegetação e caracterização da função de grandes áreas (LI et al., 2007;

KNOX et al., 2017). A partir dessa integração pode-se avaliar a capacidade de metabolismo de cada ecossistema em tempo (horas e décadas) e espaço (escalas) (ODUM, 1969; VERNADSKY, 1998).

O sistema EC e a tecnologia de sensoriamento remoto aumentaram bastante as oportunidades para a quantificação da GPP em escalas regionais ou globais. As informações do EC podem ser usadas para calibrar e validar modelos ecológicos, fornecendo informações importantes associadas com o período fotossintético e a GPP na escala do ecossistema (BALDOCCHI, 2003; SONG et al., 2011). É uma ferramenta eficaz e poderosa para monitorar propriedades da superfície do solo e obter informações espaço-temporais e, em seguida, estimar a GPP regional e a produção primária líquida (NEE), que pode ser consistente com a pegada da torre EC (GAMON et al., 2013; ZHANG e JIA, 2013). No entanto, ainda faltam links e pontes inter-relacionados entre EC e SR (KANG et al., 2018).

2.3.1 Método de correlações turbulentas (EC)

O método de correlações turbulentas, também conhecido como sistema de *eddy covariance* (EC), é considerado um método padrão, devido à capacidade de co-mensuração dos fluxos de calor sensível (H), fluxo de calor latente (λE) e CO_2 . A estimativa desses fluxos parte dos conceitos das trocas turbulentas desses fluxos entre a superfície e a atmosfera, envolvendo medidas dos desvios da velocidade vertical do vento, da temperatura, da pressão de vapor, dentre outras variáveis, a uma medida acima da superfície (SANTOS, 2009). Sua medição corresponde a um valor médio para uma área que pode variar de 50 a 200 metros de raio (ALLEN et al., 2011), essa área de contribuição depende da intensidade do movimento do ar, levando em consideração a velocidade e direção do vento no instante da medição. O EC pode fornecer dados a cada 30 minutos.

Umas das vantagens no uso do método EC é que a superfície não é perturbada, e os fluxos medidos são espacialmente calculados sobre uma grande área na direção do vento (*footprint*), além disso, o EC é capaz de realizar medições automáticas e contínuas a longo prazo (BURBA, 2013).

Desde o final dos anos 80, o sistema EC tem sido amplamente utilizado por micrometeorologistas, ecologistas, cientistas do solo e outros cientistas ambientais (BURBA, 2013). As medições do EC também produzem informações sobre como o metabolismo do

ecossistema responde a uma infinidade de forças bióticas, como luz, temperatura, chuva, umidade do solo, CO₂, fenologia e traços estruturais e funcionais da planta (LAW et al., 2002; VAN DIJK et al., 2005; REICHSTEIN et al., 2007; REICHSTEIN et al., 2014). Quando as medições de fluxo são emparelhadas com um controle e um conjunto de tratamentos ou gradientes climáticos/ecológicos, elas podem ser usadas de uma maneira experimental para estudar fatores de variação espacial tais como fenologia, clima, reservatórios de carbono do solo, planta funcional e propriedades estruturais, uso do solo e perturbação (GOULDEN et al., 2006; ANDERSON - TEIXEIRA et al., 2011; RICHARDSON et al., 2013; REICHSTEIN et al., 2014; GOUGH et al., 2016; CURTIS E GOUGH, 2018; HEMES et al., 2019).

As torres de fluxo de covariância por redemoinho fornecem uma maneira precisa de quantificar a magnitude da GPP, ET e, conseqüentemente, WUE sobre ecossistemas terrestres (XIAO et al., 2013). As torres são normalmente instaladas em alturas baixas acima do dossel para fornecer dados significativos e facilmente interpretáveis de quantificar os componentes do balanço de carbono sobre a vegetação. Esses conjuntos de dados são amplamente usados para construir, validar e otimizar modelos biogeoquímicos e outros (como dados orientados para *upscale* de produtos, modelos de cultura, modelos hidrológicos e modelos fenológicos) que são usados em diferentes escalas espaciais (HEINSCH et al., 2006; FRIEND et al., 2007 ; STÖCKLI et al., 2008; MAHECHA et al., 2010; SCHWALM et al., 2010 ; CHEN et al., 2011; JUNG et al., 2011; WU et al., 2011; VERMA et al., 2014 ; XIAO et al., 2014; MERONI et al., 2019).

2.3.2 Sensoriamento remoto - MODIS

Sensoriamento remoto, termo usado no início dos anos de 1960 por Evelyn L. Pruit e colaboradores (PRUIT et al., 1960), é uma das mais bem-sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoramento dos recursos terrestres em escala global (MENESES, 2012). LILLESAND E KIEFER (1994) definiram sensoriamento remoto como a ciência e a arte de obter informação sobre um objeto (alvo), área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sob investigação.

Através de sensores acoplados em satélites é possível coletar dados de toda a superfície terrestre de forma remota. Os recursos naturais e o meio ambiente da Terra estão sempre em

constante mudança, e para compreender melhor a evolução natural e as atividades humanas são necessários estudos observacionais com uma grande gama de escalas temporais e espaciais. A observação da Terra por meio de satélites é a maneira mais efetiva e econômica de coletar os dados necessários para monitorar e modelar estes fenômenos, especialmente em países de grande extensão territorial, como o Brasil (SAUSEN, 2017).

O MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um instrumento a bordo dos satélites Terra (EOS AM-1) e Aqua (EOS PM-1), que são duas missões EOS lançadas em 1999 e 2002 respectivamente. De acordo com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) “EOS (*Earth Observing System*) é coordenado por uma série de satélites em órbita polar e baixa inclinação para observações globais de longo prazo da superfície terrestre, biosfera, terra sólida, atmosfera e oceanos” (HE, 2018).

A órbita ao redor da Terra é cronometrada para que passe de norte a sul através do equador pela manhã, enquanto Aqua passa de sul para norte sobre o equador à tarde. Terra MODIS e Aqua MODIS visualizam toda a superfície da Terra a cada 1 a 2 dias, adquirindo dados em 36 bandas espectrais, ou grupos de comprimentos de onda. A Tabela 1 resume as informações dos satélites Terra e Aqua compilado por PARKINSON et al. (2006).

Tabela 1. Resumo dos satélites Terra e Aqua.

Satélite	Primeira Missão	Lançamento	Passa pelo equador	
			Direção	Horário
Terra	Atmosfera, terra e oceanos	Dezembro, 1999	Norte para Sul	Manhã
Aqua	Água, fluxo de energia, aerossóis, etc	Maior, 2002	Sul para Norte	Tarde

Os dados MODIS nos oferecem subsídios para melhorar a compreensão da dinâmica global e dos processos que ocorrem na terra, nos oceanos e na baixa atmosfera. MODIS está desempenhando um papel vital no desenvolvimento de modelos validados, globais e interativos do sistema terrestre, capazes de prever mudanças globais com precisão suficiente para ajudar os formuladores de políticas a tomar decisões acertadas em relação à proteção do meio ambiente (NASA, 2020). Apresentando grande importância no monitoramento das mudanças climáticas

em grande escala na biosfera, levantando questionamentos sobre o funcionamento do ciclo do carbono global (TERRA, 2018).

O sensor MODIS/Terra foi desenvolvido com o intuito de realizar o monitoramento frequente a longo tempo da superfície terrestre para um maior entendimento das mudanças globais. Esse sistema apresenta ampla cobertura espacial e espectral, continuidade nas tomadas de medidas e é o primeiro a apresentar o objetivo principal para pesquisas de mudanças globais. Com uma órbita de 705 km e cobertura espectral de $\pm 55^\circ$. Suas bandas são distribuídas da seguinte forma: da 1-7 apresentam aplicações terrestres; 8-16 observações oceânicas; 17-19 medições atmosféricas; 20-36 (exceto a 26) cobrem a porção termal (BARKER et al., 1992; LATORRE et al., 2003).

2.3.2.1 Produtos MODIS

- MOD17A2H

O sistema EOS e a NASA atualmente “produz uma estimativa global regular da produtividade primária bruta diária (GPP) e a produtividade primária líquida anual (NPP) de toda a superfície terrestre a 1 km de resolução espacial, 110 milhões de células, cada uma com GPP e NPP computadas individualmente” (RUNNING et al. 2004).

O produto GPP (MOD17A2H) Versão 6 é um composto cumulativo de valores GPP com base no conceito de eficiência de uso de radiação que é potencialmente usado como entradas para modelos de dados para calcular processos do ciclo terrestre de energia, carbono, água e biogeoquímicos da vegetação. MOD17A2H é um composto de 8 dias com resolução espacial de 500 m entregue como um produto de nível 4 em grade em projeção senoidal (RUNNING et al., 2015)

Os produtos *Collection-5* e *Collection-55* Terra/MODIS GPP são validados para o Estágio-3; isso significa que sua precisão foi avaliada e as incertezas no produto foram bem estabelecidas por meio de medições independentes feitas de forma sistemática e estatisticamente robusta que representam as condições globais. Esses dados são considerados prontos para uso em aplicações científicas (RUNNING et al., 2015).

O produto MOD17A2H usa tabelas atualizadas de pesquisa de propriedades de biomas (BPLUT) e uma versão atualizada dos dados meteorológicos diários do *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO). Esses produtos são gerados na resolução nativa de 500 m usando o MODIS, através do seguinte cálculo: Índice de Área da Folha (LAI)/Fração de Radiação

Fotossinteticamente Ativa (FPAR) (MOD15A2H) composto de 8 dias com resolução de 500 m (RUNNING et al., 2015).

- MOD16A2

O produto MOD16A2 Versão 6 Evapotranspiração/Fluxo de Calor Latente é um conjunto de dados composto de 8 dias produzido com resolução de pixel de 500 metros. O algoritmo usado para a coleta de produto de dados MOD16 é baseado na lógica da equação de Penman-Monteith, que inclui entradas de dados de reanálise meteorológica diária juntamente com produtos de dados de sensoriamento remoto de MODIS, como dinâmica de propriedade de vegetação, albedo, e cobertura do solo.

Fornecido no produto MOD16A2 são camadas compostas para Evapotranspiração (ET), Fluxo de Calor Latente (LE), ET Potencial (PET) e LE Potencial (PLE) junto com uma camada de controle de qualidade. Duas imagens de navegação de baixa resolução, ET e LE, também estão disponíveis para cada grânulo MOD16A2.

Os valores de pixel para as duas camadas de evapotranspiração (ET e PET) são a soma de todos os oito dias dentro do período composto e os valores de pixel para as duas camadas de calor latente (LE e PLE) são a média de todos os oito dias dentro do período composto. O último período de aquisição de cada ano é um período composto de 5 ou 6 dias, dependendo do ano (RUNNING et al., 2017).

- MOD13Q1

Os dados do MODIS/Terra (MOD13Q1) Versão 6 são gerados a cada 16 dias em resolução espacial de 250 m como um produto de Nível 3. O produto MOD13Q1 fornece duas camadas de vegetação primária. O primeiro é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é referido como o índice de continuidade do NDVI derivado do *Advanced Very High Resolution Radiometer* da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA-AVHRR). A segunda camada de vegetação é o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI), que melhorou a sensibilidade em regiões de alta biomassa. O algoritmo escolhe o melhor valor de pixel disponível de todas as aquisições do período de 16 dias. Os critérios usados são nuvens baixas, ângulo de visão baixa e o valor NDVI/EVI mais alto (DIDAN, 2015).

3 CAPÍTULO III - EFEITOS DA DEGRADAÇÃO DO SOLO INDUZIDA PELO HOMEM NOS FLUXOS DE ÁGUA E CARBONO EM DUAS DIFERENTES COBERTURAS DE SOLO DE SEQUEIRO BRASILEIRO¹

RESUMO

O semiárido brasileiro apresenta escassez física de água e altas irregularidades sazonais e interanuais de precipitação, conhecida como uma região com secas periódicas. Esta região é coberta principalmente pelo bioma Caatinga, reconhecida como floresta tropical sazonalmente seca (SDTF - *Seasonally Dry Tropical Forest*). A disponibilidade de água no solo impacta diretamente o funcionamento do ecossistema, caracterizado por baixa fertilidade e cobertura vegetal esparsa durante a estação seca, tornando-se um ecossistema vulnerável às variações climáticas. Além disso, esta região vem sofrendo com vários problemas devido a atividades humanas ao longo dos séculos, o que resultou em extensas áreas severamente degradadas, o que agrava os impactos das variações climáticas e a suscetibilidade à desertificação. Assim, estudar o contínuo solo-planta-atmosfera nesta região, pode ajudar a entender melhor o comportamento sazonal e anual dos fluxos de água e carbono. Este estudo investigou a dinâmica dos fluxos de água e carbono durante quatro anos (2013 – 2016) usando medições de covariância de redemoinhos (EC - *Eddy Covariance*) dentro de duas áreas da Caatinga (Caatinga densa (DC - *Dense Caatinga*) e Caatinga esparsa (SC - *Sparse Caatinga*)) que sofreram pressões antrópicas. As duas áreas de estudo apresentaram comportamentos semelhantes em relação a parâmetros físicos (temperatura do ar, radiação solar, déficit de pressão de vapor e umidade relativa), exceto a temperatura do solo. A área SC apresentou uma temperatura superficial 3°C maior que a DC. A área SC apresentou maior evapotranspiração anual, representando 74% da precipitação para a área DC e 90% para a área SC. As duas áreas atuaram como sumidouro de carbono durante o período de estudo, com a área SC apresentando menor capacidade de absorção de CO₂. Em média, a área DC absorve 2,5 vezes mais carbono do que a área SC, indicando que o desmatamento da Caatinga afeta os fluxos evaporativos, reduz a fixação do carbono atmosférico, influenciando na capacidade de mitigar os efeitos do aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera.

Palavras-chave: Eddy covariance; monitoramento; contínuo solo-planta-atmosfera; Caatinga.

¹ Artigo publicado em 2021 na “Science of the Total Environment. Link: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>”

3.1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro é evidenciado pela escassez de recursos naturais de reservas de água e irregularidades sazonais e interanuais de precipitação, conhecida como região com secas periódicas (BRASIL NETO et al., 2021). A disponibilidade de água na região afeta diretamente o funcionamento do ecossistema. Essa região semiárida apresenta baixa fertilidade e escassa cobertura vegetal no período seco, caracterizando-o como um ecossistema frágil e sensível às variações climáticas (MARIANO et al., 2018; YANG et al., 2019). Esta região vem sofrendo vários problemas devido às atividades humanas ao longo dos séculos, resultando em extensas áreas severamente degradadas (ANTONGIOVANNI et al., 2020), o que agrava os impactos das variações climáticas e a suscetibilidade à desertificação (CRISPIM et al., 2013; IPCC, 2019).

No geral, foi demonstrado que os processos de degradação podem começar com desmatamento e a substituição da vegetação nativa por áreas com diferentes tamanhos de espécies e/ou ciclos de vida (ANTONGIOVANNI et al., 2020). Assim, a vegetação arbustiva e arbórea da Caatinga é substituída por vegetação de pastagens ou culturas de ciclo curto. Transições contínuas de cobertura do solo nesta região, especialmente relacionadas à agricultura, levam à perda de fertilidade do solo, o que afeta as trocas solo-planta-atmosfera (PEREZ-MARIN et al., 2006).

O bioma Caatinga é composto principalmente por uma região de floresta tropical sazonalmente seca (SDTF), que vai do noroeste do México ao norte da Argentina (BORGES et al., 2020). Uma característica desse bioma é que a disponibilidade de água regula a duração da estação de crescimento e a sincronicidade fenológica, por exemplo, na estação seca, quase todos os indivíduos perdem folhas em comportamento decíduo síncrono (SILVA et al., 2017; ALBERTON et al., 2019). Embora a Caatinga seja o único bioma especificamente brasileiro, é o menos estudado entre os ecossistemas brasileiros e até mesmo entre outras regiões tropicais da América do Sul (CASTELETTI et al., 2004; SANTOS et al., 2011; KOCH et al., 2017). A Caatinga cobre ~11% do território brasileiro, ocupando 844.453 km², quase todos os 980.000 km² do semiárido brasileiro, que corresponde a cerca de 13% do território brasileiro (GUSMÃO et al., 2016). O monitoramento de tal bioma é bastante complexo devido à sua diversidade biótica e sensibilidade às variações. O estudo das trocas biosfera-atmosfera nesta região pode ajudar a entender melhor os fluxos de energia, água e carbono, oferecendo suporte para a gestão

e elaboração de políticas de adaptação relacionadas com as respostas dos ecossistemas às futuras mudanças climáticas.

A Caatinga tem um alto potencial de sequestro de carbono devido à alta atividade fotossintética da vegetação quando há disponibilidade hídrica (SILVA et al., 2017; MENDES et al., 2020). A produção primária bruta (GPP) ocorre durante a fotossíntese e está fortemente ligada aos processos de evapotranspiração (MARQUES et al., 2020). A quantificação dos fluxos envolvendo as trocas de água e carbono permite uma melhor compreensão da sobrevivência das plantas e do ciclo de carbono do ecossistema (LU e ZHUANG, 2010; ITO e INATOMI, 2012). É possível oferecer subsídios para avaliar a escassez de água e degradação do solo em uma determinada área (XIE et al., 2020). Essas trocas são controladas por diferentes fatores ambientais, como temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, radiação solar e umidade do solo, além de processos biológicos da vegetação (por exemplo, desenvolvimento das folhas e condutância estomática) (ZHA et al., 2013). Entender a influência desses fatores é crucial para avaliar os efeitos da gestão de projetos ecológicos e recursos hídricos (XIE et al., 2020).

A maior fonte de variabilidade interanual no sumidouro de carbono global é em terras secas, cobrindo 41% da superfície da Terra (YAO et al., 2020). Espera-se que as regiões se expandam rapidamente no próximo século, no entanto, as implicações para a variabilidade da GPP permanecem desconhecidas (ZHENG et al., 2020; YAO et al., 2020). Assim, entender o ciclo global do carbono e prever as mudanças climáticas futuras requer uma estimativa precisa da GPP da vegetação terrestre (ZHANG et al., 2017). Portanto, precisar as estimativas da GPP são necessárias para entender as mudanças no cenário regional e global no ciclo de carbono, avaliar a saúde do ecossistema e avaliar a vegetação em respostas às mudanças climáticas nos últimos anos (PEI et al., 2020; YOU et al., 2020; YAO et al., 2020). No entanto, reproduzir com precisão as variações da GPP de diferentes biomas, incluindo a Caatinga, permanecem um desafio significativo, e as mudanças da GPP de longo prazo são altamente incertas (ZHENG et al., 2020; MENDES et al., 2020). De acordo com Zheng et al. (2020), a maioria dos modelos da GPP reproduzem as mudanças espaciais, mas falham em representar as variações temporais. Com isso, entender a medição das variações interanuais da GPP para validação do modelo são críticas, porque as mudanças climáticas e atividades humanas intensivas afetam significativamente a produtividade da vegetação, causando degradação generalizada em vários ecossistemas, particularmente em terras secas (YOU et al., 2020; YAO et al., 2020).

Poucos estudos foram realizados sobre as trocas biosfera-atmosfera na Caatinga (SILVA et al., 2017; CAMPOS et al., 2019; MENDES et al., 2020; BORGES et al., 2020). Além disso, não há estudos sobre os efeitos da degradação do solo induzida pelo homem sobre os fluxos de água e carbono em coberturas de solo contrastantes neste bioma. Medições usando o sistema de covariância turbulenta (EC) permite quantificar as trocas de água e carbono entre a biosfera e a atmosfera (BALDOCCHI, 2014; CHIEN et al., 2018; KANG et al., 2018; COFRE e HESTIR, 2019; TARIN et al., 2019; ANAPPALI et al., 2019). Sabe-se que o estudo do balanço de carbono em diferentes ecossistemas desempenha um papel crucial no fornecimento de dados de entrada para modelos de grande escala (ZHOU et al., 2020). Dois estudos principais foram realizados usando medições de fluxo de CO₂ na Caatinga. Silva et al. (2017) investigaram áreas da Caatinga preservada e pastagens em Pernambuco, enquanto Mendes et al. (2020) estudaram a variação sazonal de trocas de CO₂ na Caatinga preservada no estado do Rio Grande do Norte. Portanto, nenhum estudo comparou os fluxos de água e carbono na Caatinga em diferentes estágios de degradação do solo em uma mesma região em condições atmosféricas semelhantes.

A restauração da vegetação é um método eficaz para controlar a desertificação (LE HOUÉROU, 2000) e uma ferramenta essencial para as regiões semiáridas na recuperação do ciclo do carbono (ZHOU et al., 2020). O estudo de áreas degradadas e o processo de recuperação da vegetação é essencial para a compreensão do seu papel na troca de calor e massa em diferentes estágios de cobertura do solo. Além disso, para entender como uma região é afetada por mudanças climáticas e fatores antrópicos (degradação do solo) podem afetar o microclima e o processo de desertificação (GUSMÃO et al., 2016). A eficácia e precisão das estimativas da GPP são extremamente importantes para determinar a contribuição da atividade humana e das mudanças climáticas (YOU et al., 2020). Assim, este trabalho teve como objetivo analisar as variações sazonais e anuais da dinâmica dos fluxos de água e carbono em duas áreas da Caatinga que apresentam graus variados de degradação induzida pelo homem em quatro anos (2013 - 2016), baseado em duas torres micrometeorológicas.

A área de Caatinga densa (DC) é atualmente definida como uma área de preservação ambiental e está em processo de recuperação há aproximadamente 80 anos. A área de Caatinga esparsa (SC) ainda está fortemente degradada, com vegetação esparsa e baixa. Comparar esses fluxos em duas áreas próximas sob condições meteorológicas semelhantes, mas com diferentes estágios de degradação do solo induzida pelo homem, busca uma quantificação precisa e análise da resposta dessas duas áreas a vários graus de antropização e como isso pode impactar o

microclima local. Para atingir os objetivos, este estudo foi realizado com base nos materiais e métodos descritos na Seção 2.2. Os resultados encontram-se na Seção 2.3, seguido da análise e discussão (Seção 2.4). O capítulo termina com as conclusões enfatizando a importância da restauração de áreas degradadas (Seção 2.5).

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

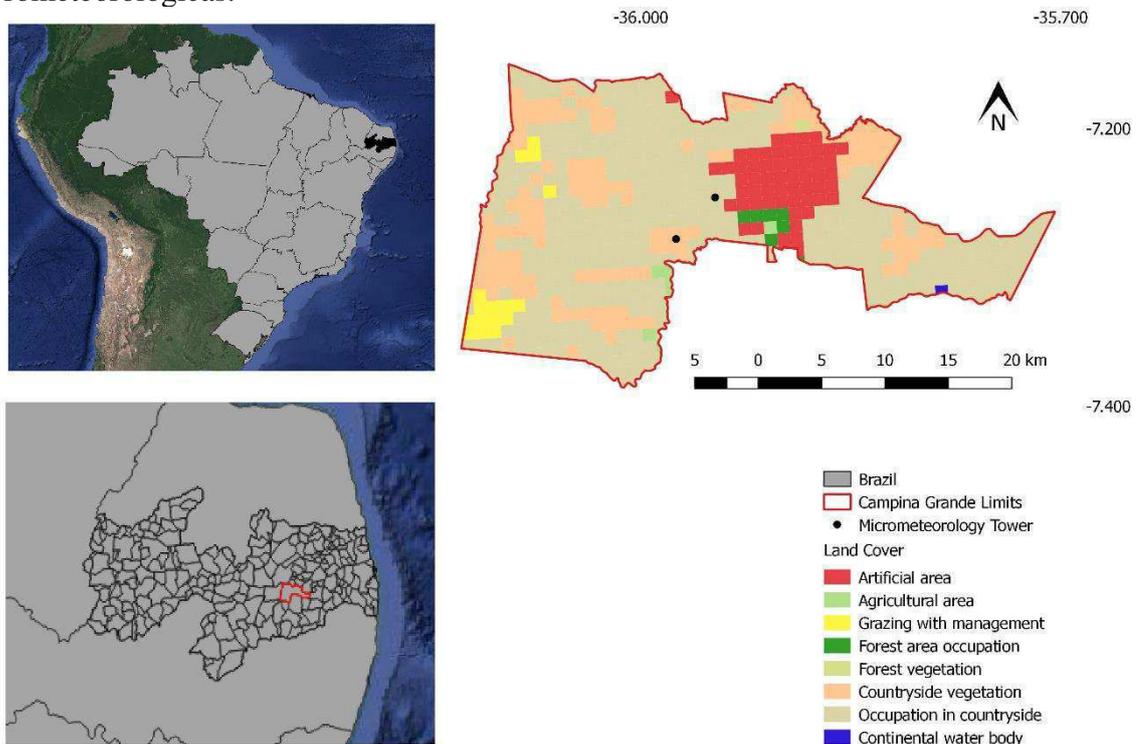
O estudo foi realizado em duas áreas do bioma Caatinga, com densidades contrastantes de cobertura vegetal. O primeiro local é uma área preservada da Caatinga em recuperação, com vegetação densa (DC). A segunda é uma área degradada com vegetação esparsa (SC), ambas localizadas em Campina Grande, estado da Paraíba, no semiárido do nordeste brasileiro. As duas áreas pertencem ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA), onde estão instaladas duas torres micrometeorológicas. As localizações espaciais das torres podem ser vistas na Figura 2. O mapa de cobertura do solo do município de Campina Grande foi extraído do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020).

A área de estudo DC possui 675 ha, dos quais aproximadamente 300 ha são de Caatinga preservada em vários estágios de regeneração. A vegetação predominante é formada por florestas sub-decíduas e decíduas, que perdem suas folhas nos meses mais secos, compostas principalmente de espécies arbustivas. A área SC é uma área antropizada, localizada a aproximadamente 1 km da área urbana da cidade de Campina Grande, apresentando vegetação com ~2 m de altura com predominância da vegetação *Mimosa hostilis*, solo nu e afloramentos rochosos (BORGES et al., 2020).

As origens dos processos de degradação nesta região estão ligadas a fatores climáticos, condições edáficas e mudanças de uso do solo. As causas da degradação são o uso inadequado dos recursos naturais, práticas agrícolas e desenvolvimento de modelos macro e microeconômico de curto prazo. A remoção da cobertura nativa por atividades antrópicas causa a redução da fertilidade do solo e aumento da erosão (PEREZ-MARIN et al., 2006), sofrendo uma redução gradual da resiliência, dificultando a recuperação dessas áreas. A área DC foi

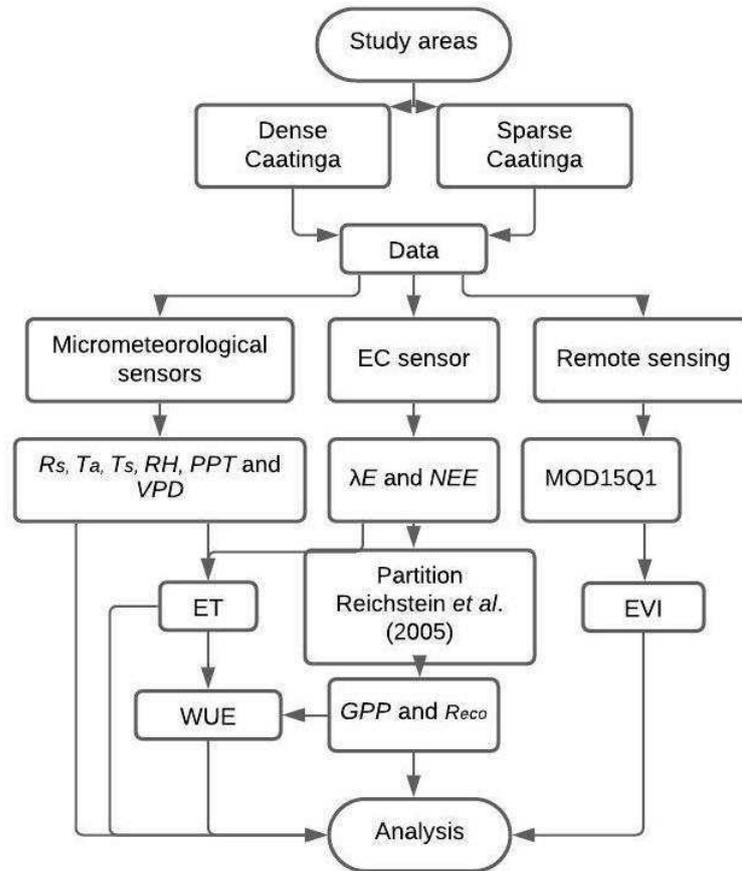
restaurada por aproximadamente 80 anos, enquanto a área de SC ainda está degradada, com um lento processo de regeneração desde 2000 (VENDRUSCOLO et al., 2020). Em ambas áreas, o tipo de solo dominante é o neossolo litólico, caracterizado como raso, atingindo uma profundidade máxima de 10 cm, drenagem moderada a imperfeita, pedregoso excessivo e relevo plano a suavemente ondulado (COSTA, 2019). Com base na classificação de Köppen, o clima da região é semiárido, Tipo BSh, baixa latitude e altitude (ALVARES et al., 2014). A estação chuvosa começa em fevereiro/março e dura até julho/agosto. De acordo com Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), a média anual da precipitação é de $\sim 783 \text{ mm ano}^{-1}$ (1935 a 2014). O fluxo metodológico deste estudo é mostrado na Figura 3.

Figura 2 - Localização da área de estudo em relação ao Brasil e Paraíba (lado esquerdo), mapa de cobertura do solo do município de Campina Grande e localização das torres micrometeorológicas.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 3 - Fluxograma metodológico do estudo.



Fonte: Elaboração Própria

3.2.2 Dados

Na área DC, a torre foi instalada em janeiro de 2013 a uma altura de aproximadamente 7 m do solo e 2 m acima da copa da vegetação. Na área SC, a torre foi instalada em março de 2013 a uma altura de aproximadamente 3 m do solo, ambas instrumentadas com sensor EC e sensores micrometeorológicos. As medidas foram obtidas de janeiro de 2013 a dezembro de 2016.

A instrumentação EC nas torres consiste em um anemômetro sônico 3D (CSAT3A, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) para medir as três componentes da velocidade do vento (u_x , u_y , u_z) e um analisador de gás (EC, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) para obter vapor de água (H_2O) e concentrações de dióxido de carbono (CO_2). As medidas foram

feitas em alta frequência (10 Hz) e armazenadas em intervalos de 30 minutos em um datalogger modelo CR3000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA).

Um saldo radiômetro (CNR4, Kipp & Zonen, Holanda) foi usado para obter a radiação de ondas curtas (*downwelling* e *upwelling*) e as componentes de radiação de onda longa (*downwelling* e *upwelling*). Temperatura e umidade relativa foram obtidos por HC2S3-L (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA). A pressão atmosférica foi medida por um barômetro avançado (PTB110, Vaisala Corporation, Helsinque, Finlândia). As medições também incluíram duas placas de fluxo de calor do solo (HFP01, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) e dois sensores de temperatura do solo (108-L, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) instalados em 2 e 10 cm de profundidade. As medições foram realizadas em baixa frequência (5 Hz) e armazenadas em médias a cada 30 minutos em um *datalogger* modelo CR3000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA). Dados de precipitação foram obtidos junto ao INMET. Todos os sensores foram instalados acima do dossel da árvore, de acordo com as instruções do manual.

Os dados de índice de vegetação aprimorado (EVI) foram obtidos por sensoriamento remoto, utilizando o produto MOD13Q1 da *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo do satélite Terra, fornecendo um valor de índice de vegetação por pixel com uma resolução espacial de 250 m em composições de imagem de 16 dias.

3.2.3 Processamento e Análise dos Dados

Para definir a estação chuvosa, foi analisado o índice pluviométrico mensal de 26 anos (1994 – 2019), conforme registro da rede INMET. O software *LoggerNet* (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) foi usado para obter o fluxo de calor latente (λE), transformando dados brutos de 10 Hz em dados binários de 30 minutos (TOB1). O software *EdiRe* foi usado para processar os dados de alta frequência, com média a cada 30 min. Informações detalhadas sobre processamento de dados, controle de qualidade e pós-processamento podem ser encontradas em Campos et al. (2019).

De acordo com as seguintes equações, os fluxos de calor latente e CO_2 foram calculados em função da covariância entre a velocidade vertical do vento (w) (m s^{-1}), a umidade específica (q) (em kg kg^{-1}) e a concentração de CO_2 (c) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), respectivamente.

$$\lambda E = \overline{\rho w' q'} \quad (1)$$

$$FCO_2 = \overline{\rho w' c'} \quad (2)$$

onde ρ corresponde à densidade do ar (kg m^{-3}) e $\overline{w' q'}$ representa a covariância entre as flutuações de q e w , e $\overline{w' c'}$ é a covariância entre w e c . As barras superiores representam as médias dos produtos para o intervalo de amostragem de meia hora.

Para calcular a evapotranspiração diária (ET), a média das medidas diurnas do fluxo de calor latente (λE) foram usadas e aplicadas na seguinte equação:

$$ET = 86400 \frac{\lambda E_{24h}}{\lambda \rho} \quad (3)$$

onde 86.400 é a conversão de segundos para diário, ρ é a densidade da água (1000 kg m^{-3}), e λ é o calor latente de vaporização (J kg^{-1}). Para o cálculo de λ (Eq. (4)), foi utilizada a média diária da temperatura do ar (T_a).

$$\lambda = (2,501 - 0,00236(T_a(^{\circ}\text{C}))) \times 10^6 \quad (4)$$

Os fluxos de CO_2 foram particionados para separar a troca líquida do ecossistema (NEE - *Net Ecosystem Exchange*) na respiração do ecossistema (R_{eco}) e produção primária bruta (GPP). O método de partição de fluxos foi baseado em Reichstein et al. (2005). Para períodos noturnos, a GPP é considerada nula e, portanto, a NEE foi estimada da seguinte forma:

$$NEE = R_{eco}, \text{ para períodos noturnos} \quad (5)$$

$$NEE = R_{eco} - GPP, \text{ para períodos diurnos} \quad (6)$$

NEE é positiva, indicando uma fonte de carbono quando o CO_2 é transferido da superfície para a atmosfera ($GPP < R_{eco}$). NEE é negativa, indicando um sumidouro de carbono quando o CO_2 é removido da atmosfera ($GPP > R_{eco}$).

As condições meteorológicas foram avaliadas com base na radiação incidente (R_s), temperatura do ar (T_a), temperatura do solo a 2 cm de profundidade (T_s), umidade relativa (RH - *Relative Humidity*), precipitação (PPT) e déficit de pressão de vapor (VPD - *Vapor Pressure Deficit*), que é a diferença entre a pressão de vapor de saturação (e_s) e a pressão de vapor real (e_a). O método usado para calcular o VPD é descrito em Allen et al. (1998).

Para obter os dados EVI, os pixels do produto MOD13Q1 referentes as coordenadas das duas áreas foram extraídas com o software livre R versão 3.6.1 (R Core Team, 2019) através do pacote MODISTools, usando a interface RStudio versão 1.2.1335 (RStudio Team, 2019).

Primeiro, foram calculadas as médias para as diferentes variáveis micrometeorológicas (diárias (24 h) ou diurnas (5:30 – 17:30 hora local)). Então, para entender melhor o

comportamento desses fluxos, uma análise dos fluxos diários de água e carbono foi realizada juntamente com as variáveis explicativas. Posteriormente, os fluxos acumulados anuais foram avaliados baseado em Oliveira et al. (2018). Para entender melhor a relação entre PPT e ET na área de estudo, os fluxos acumulados anuais da água foram avaliados para quantificar quanto de PPT foi usado para ET. Os fluxos de carbono (NEE, Reco e GPP) também foram avaliados anualmente para determinar se as duas áreas da Caatinga (DC e SC) atuam como sumidouro ou fonte de carbono durante o período estudado.

Finalmente, a eficiência do uso da água (WUE - *Water-Use Efficiency*) ($\text{g C kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) foi calculada como a proporção de assimilação de carbono ou produtividade para perda de água. WUE foi calculada usando o método de Beer et al. (2009), a equação é comumente usada para investigar a conexão entre carbono terrestre e ciclos da água (DE OLIVEIRA et al., 2018):

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (7)$$

Em que GPP é a produtividade primária bruta (g C m^{-2}), e ET é a evapotranspiração (kg m^{-2}).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Condições Meteorológicas

A Fig. 4 mostra a série temporal das médias mensais de R_s , T_a , T_s , PPT, EVI, VPD, RH e ET, para as duas áreas de estudo (DC e SC) durante quatro anos (2013 - 2016). As variáveis apresentam lacunas devido à problemas de medição. A estação chuvosa (área sombreada nos gráficos) foi definida de março a julho, respondendo por ~70% do total anual precipitado, de acordo com a série histórica (1994 - 2019) registrada pela rede INMET.

A radiação solar incidente (R_s) (Fig. 4a) apresenta valores baixos durante a estação chuvosa (área sombreada) e valores elevados durante a estação seca para ambas as áreas. Durante o período estudado para a área DC, a R_s mínima, máxima e média mensal foram de 245 W m^{-2} em junho de 2015 (estação chuvosa), 413 W m^{-2} em novembro de 2015 (estação seca), e 355 W m^{-2} , respectivamente. A área SC apresentou valores maiores que a área DC, os valores mínimo, máximo e médio mensais de R_s foram 275 W m^{-2} em julho de 2015 (estação chuvosa), 471 W m^{-2} em novembro 2015 (estação seca) e 382 W m^{-2} , respectivamente.

A T_a média mensal para as duas áreas foi de aproximadamente 24 °C (Tabela 2), variando de 26,2 °C em março de 2013 a 21,5 °C em julho de 2015 para a área DC, e entre 26,6 °C em dezembro de 2016 e 21,8 °C em julho de 2015 para a área SC. As duas regiões apresentaram a média mínima mensal da T_a em julho de 2015 (Fig. 4b). O comportamento sazonal de T_s (Fig. 4c) segue o mesmo padrão da T_a , com um valor médio anual de 27,2 °C para DC e 30 °C para SC (Tabela 2), uma diferença de aproximadamente 3 °C a mais para a área SC. Os valores de T_s variaram entre 22,4 °C em julho de 2014 e 31,1 °C em março de 2013 para DC e entre 24,3 °C em julho de 2015 e 34,4 °C em novembro de 2015 para SC (Fig. 4c). Os valores máximo e mínimo da área DC apresentaram-se em meses semelhantes para as duas variáveis (T_a e T_s), com março e julho apresentando a média máxima e mínima, respectivamente. A área SC apresentou valor mínimo em julho para ambas as variáveis (T_a e T_s).

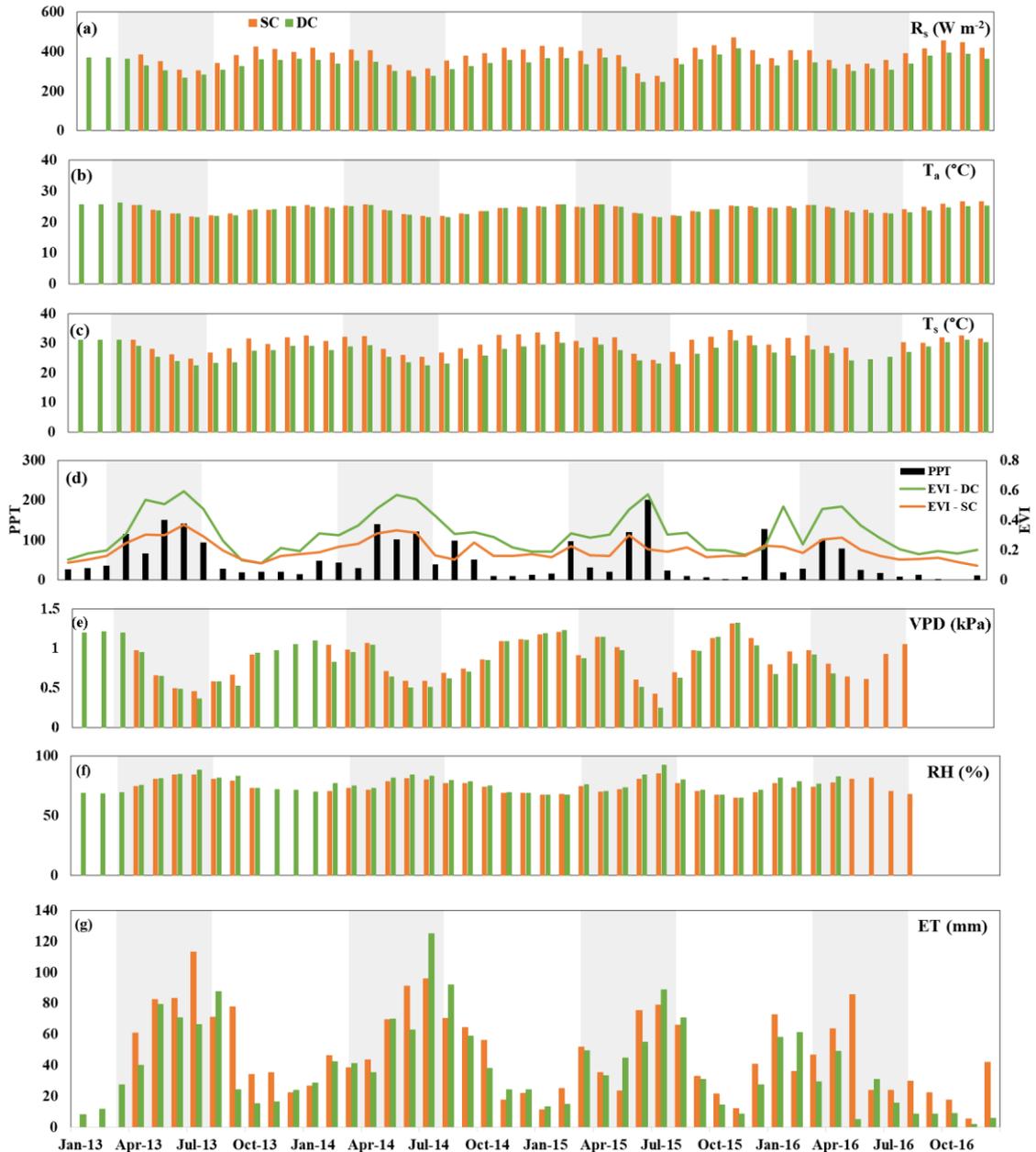
A distribuição da precipitação mensal é mostrada na Fig. 4d. O ano de 2013 apresentou uma distribuição mais homogênea durante a estação chuvosa. 2013 também apresentou a maior precipitação acumulada (754,9 mm) (Tabela 2). O segundo ano com maior precipitação acumulada foi 2014 (713,3 mm), que também teve a maioria dos dias úmidos (99 dias com precipitação superior a 1,0 mm). 2015 e 2017 apresentaram eventos extremos de precipitação com valores superiores a 60 mm d⁻¹ durante o período chuvoso. A Fig. 4d mostra o comportamento do índice de vegetação aprimorado (EVI), para entender melhor como a vegetação responde a eventos de precipitação. É possível observar que a variabilidade do EVI acompanha a disponibilidade hídrica da região, apresentando valores máximos médios mensais (0,59 e 0,37) na estação chuvosa e valores mínimos médios mensais (0,11 e 0,10) na estação seca para as áreas DC e SC, respectivamente. A média do EVI (Tabela 2) para as áreas DC e SC foi de 0,32 e 0,20, respectivamente, apresentando uma diferença de 37,5%.

Os valores médios mensais de VPD (Fig. 4e) variaram de 0,24 a 1,32 kPa para a área DC, com média de 0,85 kPa (Tabela 2). A SC variou de 0,42 a 1,31 kPa, com média de 0,86 kPa, apresentando uma média semelhante à área DC. Os valores máximos de VPD são observados durante a estação seca, mostrando um comportamento oposto a umidade relativa (RH) (Fig. 4f). Como VPD é um parâmetro que identifica o grau de secura da atmosfera, ajuda a compreender melhor o comportamento da ET. Os valores médios mensais de RH (Fig. 4f) foram superiores a 64% para ambas as áreas, apresentando valores maiores na estação chuvosa, com médias de 76% e 75% para DC e SC, respectivamente.

A ET mensal (Fig. 4g) mostrou uma média de 38,5 mm para DC e 48,2 mm para SC. As áreas DC e SC apresentaram valores máximos mensais na estação chuvosa, chegando a 125,2 mm em julho de 2014 na área DC e 113,2 mm em julho de 2013 na área SC. A ET mostrou comportamento semelhante a PPT (Fig. 4d), evidenciando sua forte dependência da disponibilidade de umidade do solo. Por causa de uma limitação instrumental, os dados de umidade do solo não foram disponíveis nas áreas de estudo.

A Tabela 2 mostra as médias para cada variável durante os períodos seco e chuvoso, respectivamente. As variáveis R_s , T_a , T_s e VPD são maiores na estação seca para ambas as áreas, e o contrário ocorre para as variáveis PPT, RH e EVI, que são maiores na estação chuvosa. 70% da PPT ocorre na estação chuvosa. Os valores de EVI na estação chuvosa tiveram média de 0,41 na área DC, enquanto a área SC apresentou média de 0,25. Os valores de VPD ficaram em torno de 0,90 no período seco e 0,75 no período chuvoso para ambas as áreas (Tabela 2).

Figura 4 - Distribuição temporal dos parâmetros ambientais: (a) Radiação incidente média mensal (R_s) ($W m^{-2}$), (b) Temperatura do ar média mensal (T_a) ($^{\circ}C$), (c) Temperatura do solo média mensal (T_s) ($^{\circ}C$), (d) Precipitação mensal (PPT) (mm) e EVI mensal, (e) Déficit de pressão de vapor médio mensal (VPD) (kPa), (f) Umidade relativa média mensal (RH), (g) Evapotranspiração mensal (ET) (mm), para o período de janeiro de 2013 a agosto de 2016 nas duas áreas de Caatinga (DC e SC). A área sombreada indica a estação chuvosa.



Fonte: Elaboração Própria

Tabela 2 - Médias anuais e cumulativas de diferentes variáveis micrometeorológicas e biofísicas para as duas áreas de Caatinga (DC e SC) (Radiação solar incidente média diária (R_s) ($W m^{-2}$), Temperatura do ar média diária (T_a) ($^{\circ}C$), Temperatura do solo média diária (T_s) ($^{\circ}C$), Precipitação anual cumulativa (PPT) (mm), EVI médio diário, Déficit de pressão de vapor médio diário (VPD) (kPa), Umidade relativa média diária (RH), Evapotranspiração cumulativa anual (ET) (mm), Produtividade primária bruta cumulativa anual (GPP) ($g C m^{-2}$), respiração do ecossistema cumulativa anual (R_{eco}) ($g C m^{-2}$) e troca líquida do ecossistema cumulativa anual (NEE) ($g C m^{-2}$)). Análise anual, estações seca e chuvosa (2013 – 2016).

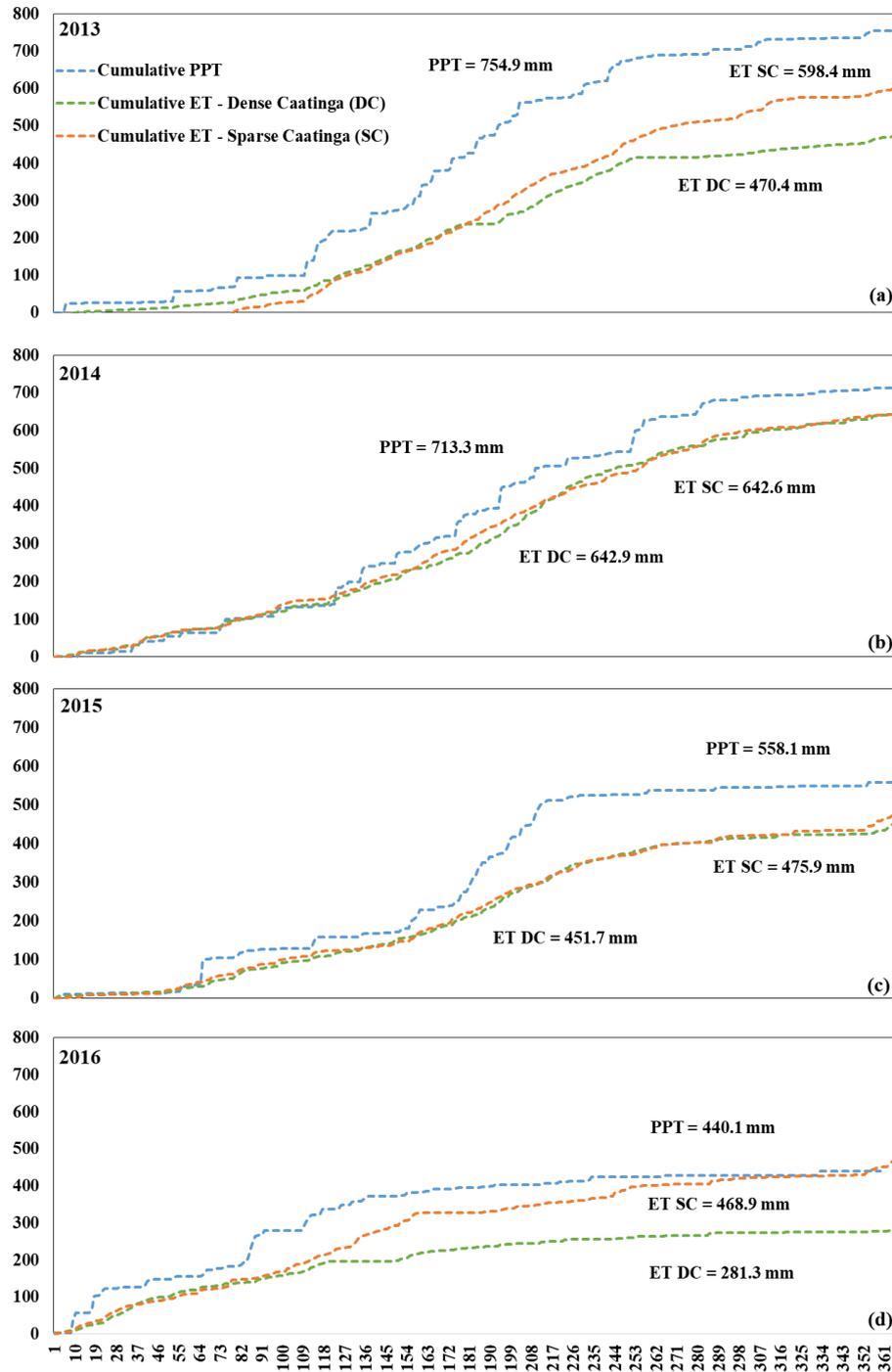
Variable	Anual									
	2013		2014		2015		2016		Average	
	DC	SC	DC	SC	DC	SC	DC	SC	DC	SC
R_s ($W m^{-2}$)	334	368	327	377	339	392	345	393	336	382
T_a ($^{\circ}C$)	24,1	23,6	23,6	23,9	24,0	24,2	24,2	24,9	24,0	24,1
T_s ($^{\circ}C$)	27,4	28,7	26,3	29,8	27,5	30,8	27,5	30,8	27,2	30,0
PPT (mm)	754,9		713,3		558,1		440,1		616,6	
EVI	0,31	0,22	0,36	0,22	0,30	0,19	0,30	0,19	0,32	0,20
VPD (kPa)	0,87	0,70	0,83	0,84	0,93	0,97	0,77	0,85	0,85	0,84
RH (%)	75,7	78,9	76,1	74,8	73,9	72,1	79,6	75,2	76,3	75,3
ET (mm)	470,4	598,4	642,9	642,6	451,7	475,9	281,3	468,9	461,6	546,5
GPP ($g C m^{-2}$)	1130,6	1030,7	1902,6	1387,4	1499,5	1170,3	2039,1	784,3	1643,0	1093,2
R_{eco} ($g C m^{-2}$)	737,2	770,8	893,6	797,5	722,9	769,8	744,9	589,2	774,7	731,8
NEE ($g C m^{-2}$)	-393,4	-259,8	-1008,7	-590	-777	-400,5	-1294,2	-195,6	-868,3	-361,5
Variable	Período seco									
	2013		2014		2015		2016		Average	
	DC	SC	DC	SC	DC	SC	DC	SC	DC	SC
R_s ($W m^{-2}$)	349	391	339	395	365	421	364	414	354	405
T_a ($^{\circ}C$)	24,1	23,5	23,7	23,9	24,2	24,4	24,4	25,3	24,1	24,3
T_s ($^{\circ}C$)	27,6	29,6	26,7	30,5	28,2	32,1	28,6	31,1	27,8	30,8
PPT (mm)	243,5		275,4		86,4		185,9		197,8	
EVI	0,22	0,18	0,30	0,18	0,23	0,17	0,24	0,16	0,24	0,17
VPD (kPa)	0,92	0,72	0,90	0,92	1,07	1,09	0,73	0,93	0,91	0,92
RH (%)	74,0	77,4	74,0	72,6	69,9	69,0	79,9	72,7	74,5	72,9
ET (mm)	187,03	240,56	308,73	303,66	180,19	209,03	152,24	225	207,1	244,6
GPP ($g C m^{-2}$)	670,09	433,78	940,9	751,86	979,68	717,73	1336,5	412,67	981,79	579,01
R_{eco} ($g C m^{-2}$)	398,1	446,0	540,0	443,7	447,4	456,0	450,0	300,6	458,9	411,6
NEE ($g C m^{-2}$)	-272,0	12,2	-400,9	-308,2	-532,3	-261,7	-886,5	-112,1	-522,9	-167,4
Variable	Período chuvoso									
	2013		2014		2015		2016		Average	
	DC	SC	DC	SC	DC	SC	DC	SC	DC	SC
R_s ($W m^{-2}$)	309	336	310	353	303	352	316	358	309	350
T_a ($^{\circ}C$)	23,9	23,4	23,6	23,6	23,8	24,0	23,7	24,1	23,8	23,8
T_s ($^{\circ}C$)	26,4	27,5	25,8	28,8	26,5	29,0	25,6	30,0	26,1	28,8
PPT (mm)	511,4		437,9		471,7		254,2		418,8	
EVI	0,43	0,28	0,45	0,29	0,39	0,21	0,37	0,22	0,41	0,25
VPD (kPa)	0,73	0,64	0,73	0,79	0,75	0,82	0,80	0,79	0,75	0,76
RH (%)	79,6	80,7	79,1	76,7	79,2	76,3	79,4	76,7	79,4	77,6
ET (mm)	283,4	340,4	334,3	338,9	271,5	265,4	130,0	243,9	254,8	297,1
GPP ($g C m^{-2}$)	460,5	550,6	961,5	635,6	520,3	450,5	704,5	372,2	661,7	502,2
R_{eco} ($g C m^{-2}$)	339,1	308,3	353,6	353,8	275,5	310,5	296,9	288,7	316,3	315,3
NEE ($g C m^{-2}$)	-121,4	-242,4	-607,9	-281,8	-244,8	-140,0	-407,6	-83,5	-345,4	-186,9

Fonte: Elaboração Própria

3.3.2 Evapotranspiração total anual

A relação entre a PPT acumulada anual e a ET acumulada anual para as áreas DC e SC são mostradas na Fig. 5. Para 2013, 2014, 2015 e 2016, a ET anual representou uma média de aproximadamente 74% da PPT para DC e 90% da PPT para a área SC, principalmente em 2014, quando a ET anual representou 90% da precipitação anual em ambas áreas. 2016 foi o ano com a menor PPT anual (440,1 mm), consideravelmente inferior à média da região ($\sim 783 \text{ mm ano}^{-1}$). O mesmo ano também apresentou a menor ET anual, 281,3 mm para DC e 468,9 mm para SC, representando uma relação ET/PPT de aproximadamente 64% para DC. Embora 2016 tenha tido a menor ET anual, ainda foi maior do que a PPT anual. Vale ressaltar que todo o período de estudo apresentou PPT anual abaixo da média histórica como uma das mais extensas e intensas secas que ocorreram no nordeste do Brasil (MARENGO et al., 2017a,b).

Figura 5 - Precipitação cumulativa (PPT) (mm) e evapotranspiração cumulativa (ET) (mm) para o período estudado (2013, 2014, 2015 e 2016) para as áreas DC e SC.



Fonte: Elaboração Própria

A ET acumulada nos períodos seco e úmido para ambas as áreas pode ser visto na Tabela 2. A ET não mostrou diferenças significativas entre os períodos, sendo um pouco maior na estação chuvosa, apresentando a média de 254,8 mm para a área DC e 297,1 mm para a área

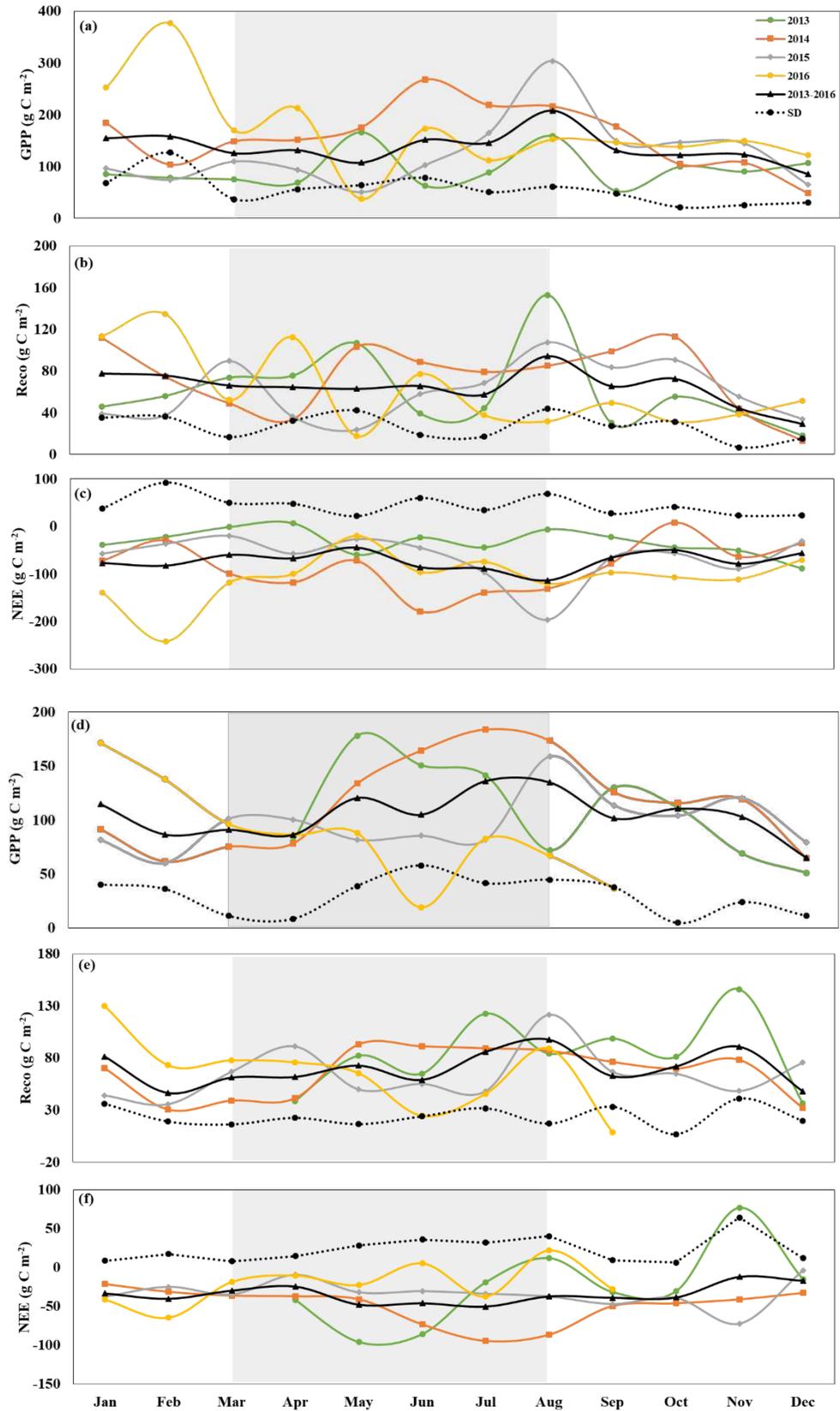
SC no período chuvoso. Os valores médios foram 207,1 mm e 244,6 mm para as áreas DC e SC durante o período seco, respectivamente.

3.3.3 Fluxos de carbono

A Fig. 6 ilustra os fluxos mensais de carbono (GPP, R_{eco} e NEE) ao longo do período de estudo para as áreas DC e SC. Na área DC (Fig. 6a, b e c), é possível notar maiores valores da GPP durante a estação chuvosa (área sombreada do gráfico), com exceção de 2016, que apresentou maior GPP em fevereiro (376,5 g C m⁻²). Isso provavelmente está relacionado à alta precipitação no mês anterior (janeiro), atingindo 127,5 mm. A média mensal da GPP para o período estudado foi aproximadamente 137 g C m⁻², com agosto apresentando o maior média mensal. A R_{eco} média mensal foi de 64,6 g C m⁻², com máxima de 152,9 g C m⁻² em agosto de 2013, com agosto também apresentando a maior média mensal. A média mensal de NEE foi de -72,4 g C m⁻², com agosto apresentando maior absorção de CO₂.

A Fig. 6 também mostra os fluxos mensais de carbono (GPP, R_{eco} e NEE) para a área SC (Fig. 6d, e e f). Maiores valores de GPP também ocorreram na estação chuvosa, apresentando média mensal de 103 g C m⁻², com registro em julho da maior média mensal (136 g C m⁻²). O mais alto valor mensal ocorreu em julho de 2014, atingindo aproximadamente 184 g C m⁻². A média mensal foi de 69,2 g C m⁻², com a maior média em agosto. O NEE médio foi -33,7 g C m⁻², com maio mostrando maior absorção de CO₂ (-96 g C m⁻²).

Figura 6 - Valores mensais de produtividade primária bruta (GPP), respiração do ecossistema (Reco) e troca líquida do ecossistema (NEE), todos os fluxos em g C m^{-2} e desvio padrão (SD) para a área DC (a, b e c) e a área SC (d, e e f).

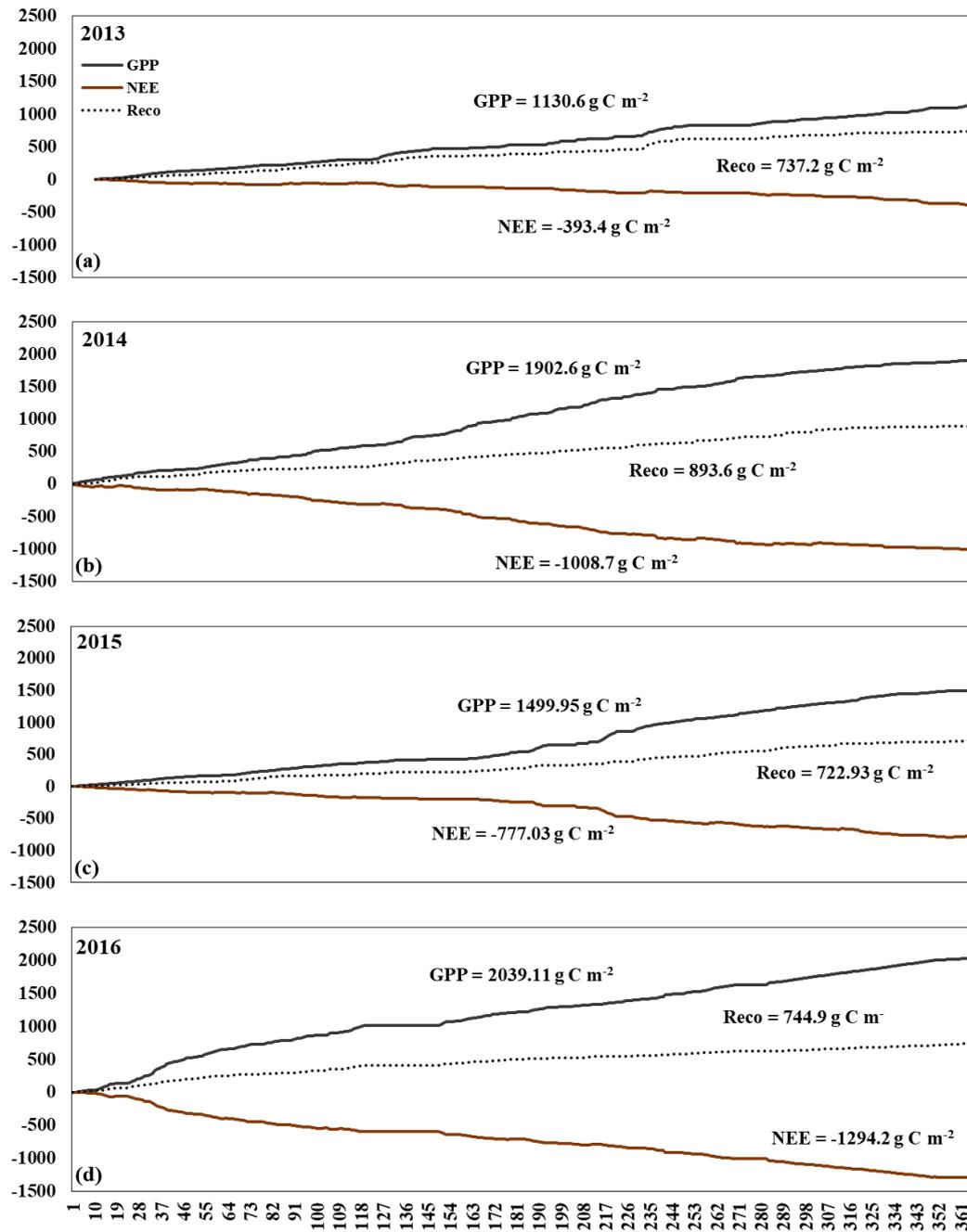


Fonte: Elaboração Própria

Observou-se que a área DC absorveu um adicional de 34 g C m^{-2} mensalmente em relação à área de SC, o que equivale a 33% a mais de carbono absorvido. Em relação a R_{eco} , as duas áreas apresentaram valores próximos, com uma ligeira diferença de 2 g C m^{-2} a mais para a área DC. Conseqüentemente, a NEE da área DC foi maior do que a área SC, com uma diferença de aproximadamente -39 g C m^{-2} mensal. Essa diferença supera a média mensal de NEE na área SC, que é apenas $-33,7 \text{ g C m}^{-2}$.

A Fig. 7 apresenta os fluxos cumulativos anuais de carbono (GPP, R_{eco} e NEE) na área DC para 2013, 2014, 2015 e 2016, mostrando que 2016 teve a maior GPP acumulada ($2039,1 \text{ g C m}^{-2}$). Como esperado, também apresentou a maior NEE ($-1294,2 \text{ g C m}^{-2}$), com o carbono total sendo fixado aproximadamente duas vezes mais que o carbono liberado por respiração ($744,9 \text{ g C m}^{-2}$). Em 2014 e 2015, o total de carbono fixado também foram maiores do que o carbono liberado pela respiração. O ano 2013 apresentou a menor GPP acumulada ($1130,6 \text{ g C m}^{-2}$). Até então, o carbono total fixado foi 53% maior que o carbono liberado. A área DC absorveu mais carbono do que emitiu durante todo o período, com o carbono total fixado médio (NEE) 1,1 vezes maior do que o carbono perdido (R_{eco}).

Figura 7 - Produtividade primária bruta acumulada anual (GPP), respiração do ecossistema (Reco) e troca líquida do ecossistema (NEE) para o período estudado (2013, 2014, 2015 e 2016) para área de Caatinga densa (DC).

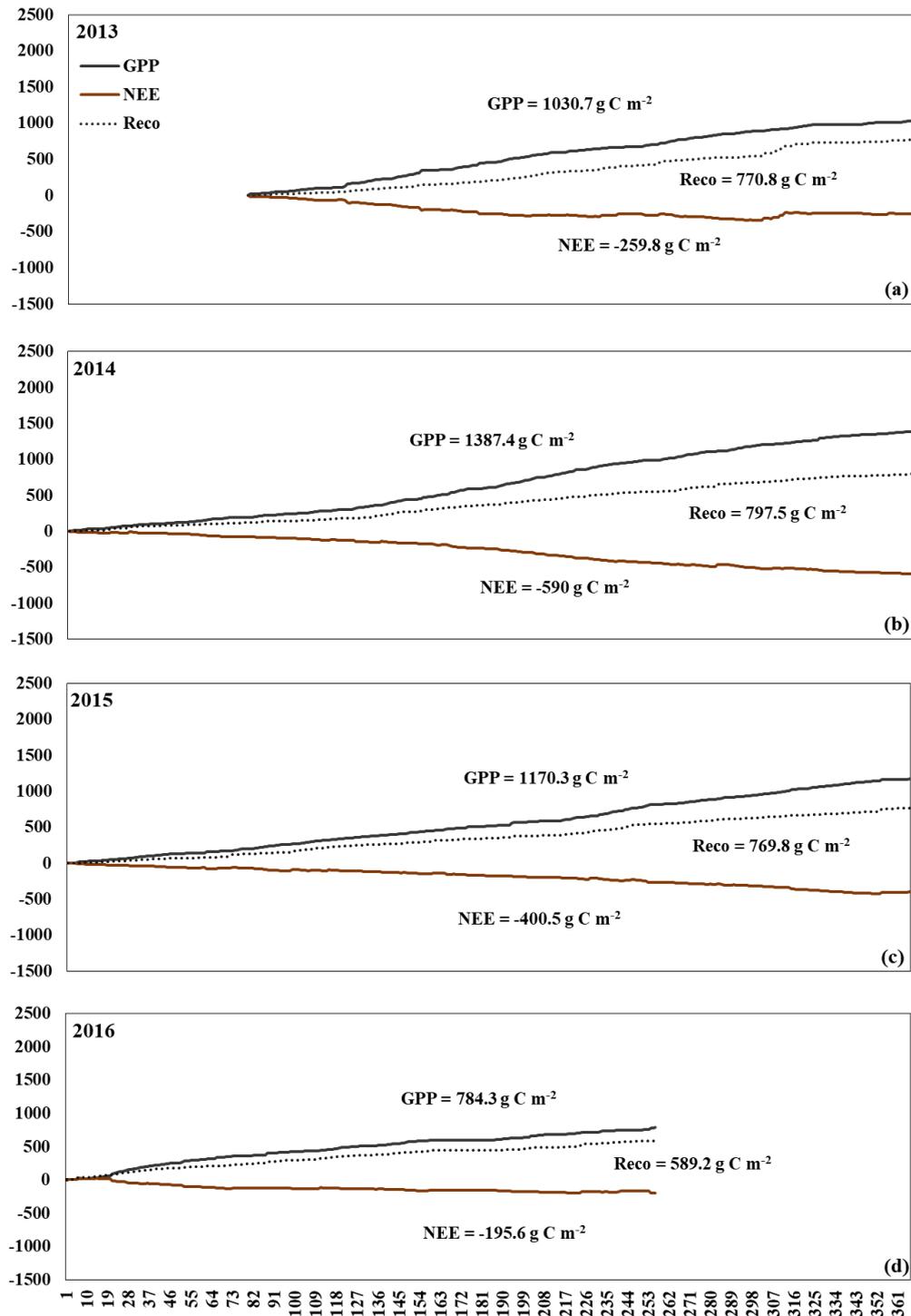


Fonte: Elaboração Própria

A Fig. 8 mostra os fluxos anuais de carbono (GPP, R_{eco} e NEE) na área SC para o período estudado (2013 - 2016). 2016 apresenta os valores acumulados para oito meses, de janeiro a agosto, devido a questões de registro do instrumento. Os fluxos de carbono cumulativos totais na Fig. 8 mostram que 2014 teve a maior GPP acumulada (1387,4 g C m⁻²). Consequentemente, a NEE mais alta (-590 g C m⁻²), com o carbono total fixado 74% maior que o carbono liberado pela respiração, 2014 e 2015 apresentaram valores de carbono total fixado

51% superiores ao carbono liberado. Em 2013 e em 2016, o carbono total fixado foi 33% maior que o carbono perdido pela respiração. Assim, durante todo o período, a área absorveu mais carbono do que emitiu.

Figura 8 - Produtividade primária bruta acumulada anual (GPP), respiração do ecossistema (Reco) e troca líquida do ecossistema (NEE) para o período estudado (2013, 2014, 2015 e 2016) para a área de Caatinga esparsa (SC).



Fonte: Elaboração Própria

Apenas o conjunto de dados completos de dois anos da área SC (2014 e 2015) e quatro anos da área DC (2013 - 2016) foram usados para comparar os totais anuais para as duas áreas. A diferença média anual da GPP foi $364,2 \text{ g C m}^{-2}$ a mais para a área DC, R_{eco} apresentou valores similares próximos a 780 g C m^{-2} para ambas as áreas. Assim, a DC absorveu mais carbono, apresentando uma média anual de NEE de cerca de -868 g C m^{-2} . Em contraste, a área SC absorveu cerca de -495 g C m^{-2} , correspondendo a 56% da absorção total de carbono da área DC.

Além disso, avaliou-se o fluxo de carbono sazonal (seco e chuvoso) (Tabela 2). Observou-se que GPP e R_{eco} apresentaram maiores valores acumulados no período seco do que no período chuvoso para as duas áreas. Consequentemente, apresentar NEE mais baixa não significa necessariamente que maiores valores de absorção de carbono são encontrados no período seco. Valores mais altos dos fluxos de carbono ocorreram no período chuvoso (Fig. 5). No entanto, como o período chuvoso (cinco meses) é menor que o período seco (sete meses), os valores totais podem ser maiores no período seco.

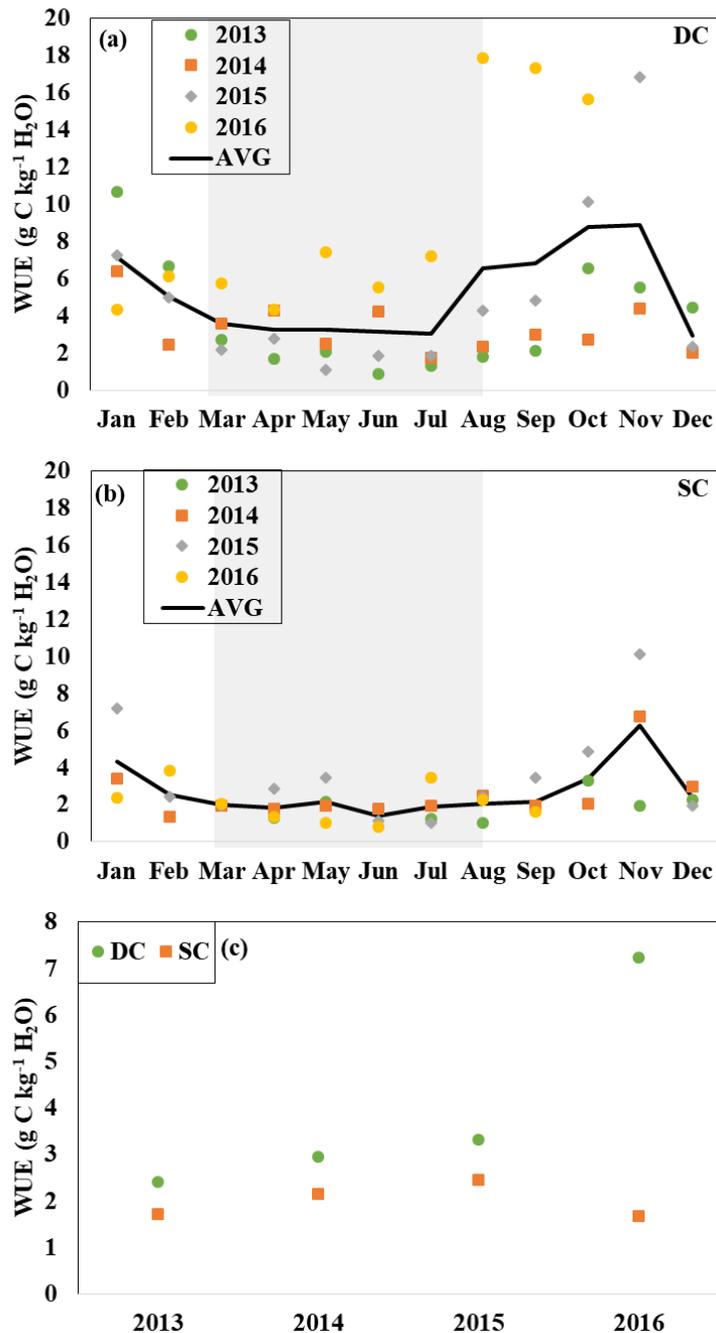
3.3.4 Eficiência do uso da água (WUE)

A média anual da WUE foi de 5,2 e $2,7 \text{ g C kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ para as áreas DC e SC, respectivamente. Ambas as áreas apresentaram valores baixos de WUE na estação chuvosa (Fig. 9) devido ao maior consumo de água. A área SC apresentou menores valores de WUE em relação à área DC. Isso provavelmente ocorre devido ao rápido crescimento de vegetação herbácea, indicando uma alta taxa de perda de água. Outro fator que contribui para a baixa WUE na área SC está relacionada a alta perda de água do solo. Isso ocorre porque a área SC tem um maior percentual de solo nu, o que favorece a perda de água por evaporação. A Fig. 9c mostra a WUE anual, evidenciando que na área SC a WUE foi menor que na área DC em todos os anos, sendo 2016 significativamente maior para a área DC. As médias de WUE para a estação chuvosa foram 3,3 e $1,9 \text{ g C kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, enquanto as médias na estação seca foram 6,6 e $3,3 \text{ g C kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, para as áreas DC e SC, respectivamente.

Os valores de WUE na Caatinga mostraram-se elevados em relação aos estudos em outras áreas (DE OLIVEIRA et al., 2018) devido ao mecanismo de fotorrespiração das plantas

presentes no bioma Caatinga (C4 e CAM), C4 e CAM são plantas comuns em regiões áridas e semiáridas. Estas plantas têm adaptações para fixação de carbono e perda de água devido ao estresse hídrico, que os leva a perder menos água por transpiração (via fechamento estomático) (HATFIEL e DOLD, 2019), apresentando, portanto, maior eficiência no uso da água.

Figura 9 - Eficiência mensal do uso da água (WUE) ($\text{g C kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) para DC (a) e SC (b) e anual para ambas as áreas (c) de 2013 a 2016, A área sombreada representa a estação chuvosa.



Fonte: Elaboração Própria

3.4 DISCUSSÃO

As condições meteorológicas observadas durante o experimento mostraram que a região esteve sob condições de seca durante a maior parte do período de estudo, com precipitação anual abaixo da média histórica da região. As causas da seca foram devido à influência das anomalias positivas nas temperaturas da superfície dos Oceanos Pacífico Equatorial e Atlântico Norte Tropical, com o desenvolvimento do fenômeno *El Niño*, principalmente em 2015, e contribuindo para o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ - *Intertropical Convergence Zone*) ao norte do equador, causando uma redução na precipitação (MARENGO et al., 2017a,b).

Observa-se na Fig. 4a que os valores máximos de R_s são identificados na estação seca, quando a menor cobertura de nuvens é notória, causando menos interferência na radiação solar incidente. Os maiores valores de R_s foram encontrados na região de SC. Os dados da T_a foram semelhantes para ambos os locais, apresentando valores médios de aproximadamente 24 °C. A partir da Fig. 4b, observa-se que após a estação chuvosa de 2016, os valores de T_a para a área SC diferem dos valores da área DC, apresentando um aumento médio de aproximadamente 1,2 °C, com uma pequena variação em seu comportamento no final do período estudado. Essa variação pode ser explicada pelo aumento de R_s no mesmo período. As altas temperaturas em 2016 são provavelmente um efeito da seca que ocorreu naquele ano. Como pode ser visto na Tabela 2, 2016 apresentou a menor precipitação anual em relação aos demais anos estudados. A variação sazonal da média diária da T_a foi de aproximadamente 10 °C, com valores máximos observados na estação seca, na qual o céu claro proporciona uma maior absorção superficial de R_s à medida que as nuvens reduzem a quantidade de energia solar recebida na superfície da Terra devido à sua alta refletividade (QUERINO et al., 2011).

T_s na área SC é, em média, 3°C maior do que na área DC, isto é explicado porque SC está sob severa degradação do solo e tem uma maior porcentagem de solo nu, absorvendo mais energia, aumentando assim a T_s . Colaizzi et al. (2016) explicam que em solos nesta condição, o fluxo de calor no solo (G) pode corresponder a até 50% da radiação líquida (R_n) devido à variação considerável na entrada da R_s no solo.

A distribuição temporal da precipitação teve um impacto significativo no EVI (Fig. 4d). A alta sazonalidade é evidenciada pela cobertura vegetal durante o período estudado, com maior variação para a área DC, por ser uma área com mais cobertura vegetal. A área DC atingiu o

valor máximo diário (0,74) durante a estação chuvosa e o menor (0,06) durante a estação seca, mostrando a alta sazonalidade da Caatinga. A fenologia da vegetação tende a responder rapidamente aos eventos de chuva. Assim, durante a estação chuvosa, espera-se que a vegetação, principalmente espécie decídua, fortaleça suas atividades metabólicas, como observado por Barbosa e Kumar (2016) e da Silva et al. (2017).

Diferenças na cobertura vegetal foram observadas entre as duas áreas estudadas para a estação chuvosa, com variação média de 0,16, o que corresponde a aproximadamente 39%. No período seco, quando ocorre o processo de senescência, a área DC ainda apresenta valores maiores que a área SC devido à presença de algumas espécies semidecíduas (MARQUES et al., 2020).

Os valores de VPD e RH apresentaram comportamentos opostos para as duas áreas, como mostrado na Fig. 4e e f. Evidencia-se que, à medida que VPD aumenta, a RH diminui e, conseqüentemente, diminui a ET (Fig. 4g), este comportamento é porque o VPD indica o grau de secura da atmosfera; assim, há uma relação direta entre esses três parâmetros. Portanto, uma vez dependente do gradiente de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar, nos períodos chuvosos é normal a atmosfera estar frequentemente com alto teor de umidade, reduzindo significativamente o VPD (RODRIGUES et al., 2011).

Como esperado, a ET atingiu seu máximo na estação chuvosa para ambas áreas. Na estação seca, a resposta da senescência foliar ao estresse hídrico reduz as taxas da ET (MARQUES et al., 2020). O comportamento da ET na Caatinga foi consistente com estudos anteriores na região do semiárido brasileiro, de acordo com Silva et al. (2017) e Marques et al. (2020).

A área SC apresentou os maiores valores da ET acumulada anual, mostrados na Tabela 2 e Fig. 5. Uma das hipóteses para este comportamento é que haveria maior evaporação do solo, pois é uma área com grande parcela de solo nu (GRAF et al., 2020), além do rápido crescimento de vegetação herbácea, favorecendo a transpiração. Além disso, as plantas são mais jovens, tendendo a uma ET maior do que as plantas mais antigas da área DC. Portanto, adicionando os dois mecanismos (evaporação + transpiração) de perda de água, a SC torna-se responsável pela maior transferência de água para a atmosfera. Como a área DC possui solo mais coberto (maior EVI), a ET pode ser menor em relação à redução da perda de água por evaporação. Também, as plantas DC possuem mecanismos para reduzir o processo da perda de água pela transpiração (FREITAS et al., 2006; MENEZES et al., 2013).

Uma forte relação entre GPP (Fig. 6) e EVI (Fig. 4d) foi observada durante o período de estudo. Xu e Baldocchi (2004), Gitelson et al. (2014), e de Oliveira et al. (2018) encontraram resultados semelhantes, considerando diferentes tipos de vegetação. É importante notar que Mendes et al. (2020) também observaram uma forte relação entre EVI e GPP em área da Caatinga. A relação entre GPP e EVI é observada com maior intensidade na área DC (a área com maior GPP).

Em ambas as áreas, observou-se que as taxas da GPP superaram a R_{eco} , atuando como um sumidouro de carbono. Resultado semelhante foi encontrado por Rotenberg e Yakir (2010) ao estudar a contribuição das florestas semiáridas para o sistema climático. Na região DC, 2016 foi o ano que apresentou GPP 2,7 vezes maior do que R_{eco} . Os maiores valores de R_{eco} também foram registrados no mesmo ano, talvez esteja relacionado ao aumento do EVI. A média da relação GPP/R_{eco} para a região DC foi de 2,2. Na região SC, a média é de aproximadamente 1,5, e a maior relação GPP/R_{eco} (ou seja, 1,7) foi verificada em 2014. Esses resultados concordam com os encontrados em várias regiões semiáridas do mundo e descrito por Baldocchi et al. (2018), apresentando uma revisão completa da variabilidade interanual dos fluxos de carbono líquido e bruto de diferentes ecossistemas.

Na estação seca, os valores dos fluxos de carbono tendem a diminuir consideravelmente (Fig. 6). Isso se deve à ocorrência da senescência foliar e o fato de que as atividades fotossintéticas são restritas a algumas espécies de plantas semidecíduas, como mencionado anteriormente. Mendes et al. (2020) explicam que as árvores provavelmente sofrem com a diminuição do teor de água no solo durante a estação seca, levando à redução da condutância estomática e transpiração foliar, limitando a assimilação de CO_2 , reduzindo a fotossíntese líquida. Os valores de R_{eco} para a Caatinga são considerados abaixo da média em comparação com outros estudos em diferentes ecossistemas (BALDOCCHI et al., 2018). Isso porque o bioma Caatinga (predominância de vegetação herbácea) tem estoques de carbono mais baixos do que regiões úmidas (árvores mais altas e copas vigorosas do sub-bosque) (PLAZA et al., 2018, BALDOCCHI et al., 2018). Além disso, as plantas tendem a manter a respiração em níveis basais durante eventos de escassez de água, apresentando baixas taxas de respiração (SANTOS et al., 2014).

A Tabela 2 mostra que 2016, apesar de ter a maior NEE, também teve a menor PPT e ET para a área DC. Baldocchi (2019) explica que 57% da variabilidade interanual da NEE é causada por efeitos biológicos, e o residual (43%) devido às condições climáticas. Nesse

sentido, é hipotetizado que esses aumentos inesperados no NEE em 2016 podem ser altamente relacionados com a fenologia da vegetação, com pequenas influências dos parâmetros físicos.

A partir da Fig. 6, observam-se altas taxas de respiração, principalmente na área SC. Esses valores máximos provavelmente estão relacionados ao “efeito Birch” (BIRCH, 1958; JARVIS et al., 2007), onde as chuvas em ecossistemas semiáridos podem induzir a enormes pulsos de CO₂, com o tamanho do pulso dependendo do grau de fotodegradação antecedente, diminuindo com o tempo, após sucessivos eventos de chuva (HUXMAN et al., 2004; MA et al., 2012). Maiores taxas de R_{eco} na área DC podem estar relacionadas à produção de raízes e as contribuições proporcionais da respiração do solo mais jovem, além da decomposição da matéria orgânica.

A Tabela 2 mostra que a área DC teve a maior taxa de assimilação de CO₂ que a área SC (até 2,5 vezes). A relação R_{eco}/GPP é de 46% para DC e 66% para SC, ou seja, a área SC devolve 20% mais carbono do que foi absorvido pela GPP para a atmosfera do que a área DC. Baldocchi (2019) explica que a duração da estação de crescimento afeta substancialmente a soma de carbono assimilado. Como resultado, uma área degradada com baixa cobertura vegetal e uma estação de crescimento mais curta tendem a absorver menos CO₂, como observado por Rotenberg e Yakir (2010). No entanto, durante o período do estudo, observou-se uma alta variabilidade interanual. Diversos estudos mostraram que os fluxos de carbono ecossistema-atmosfera sofrem graus variados de variabilidade interanual devido a fatores climáticos, ecológicos, e fatores fisiológicos, como afirmou Baldocchi et al. (2018). Assim, mais tempo de conjuntos de dados são necessários para detectar e explicar melhor as causas dessa variabilidade.

Uma das aspirações deste estudo foi avaliar a variabilidade interanual dos fluxos de água e carbono no bioma Caatinga sob diferentes estágios de degradação do solo induzida pelo homem. Vale a pena destacar um evento de seca severa na área durante o período de estudo, mostrando a precipitação abaixo da média histórica. Análises semelhantes em períodos mais úmidos, incluindo avaliações do teor de água do solo e da condutância estomática da vegetação, seria interessante para entender melhor essas interações.

Mesmo considerando que apenas quatro anos foram utilizados neste estudo, os resultados aqui obtidos podem apoiar políticas de gestão e práticas que minimizem os efeitos das variações climáticas, contribuindo para estratégias de adaptação para este bioma particular e importante da América do Sul. Estudos recentes indicam uma tendência da redução de áreas com vegetação nativa, resultando em maior degradação do solo, desencadeada por substituição

da cobertura natural da terra por pastagens e terras agrícolas (ANTONGIOVANNI et al., 2020). Assim, segundo Strassburg et al. (2020), os efeitos da degradação do ecossistema e das mudanças climáticas têm resultado em um interesse significativo na restauração de ecossistemas a níveis regional, nacional e global. A conservação de ecossistemas naturais e áreas remanescentes é o foco mais crítico para a preservação da biodiversidade.

Compreender como os diferentes tipos de degradação em um ecossistema tão único no meio ambiente, tendo em vista que a Caatinga é o único bioma que existe exclusivamente no território brasileiro, e o conseqüente impacto dos fluxos de água e carbono tem relevância internacional, por exemplo, estabelecer comparações sobre como diferentes biomas são afetados por regimes de perturbação, como pode ser visto, por exemplo, em Miao et al. (2009), Silva et al. (2017), McNicol et al. (2018), Sagar et al. (2019), Brandão et al. (2019), Yao et al. (2020) e Antongiovanni et al. (2020). Esses resultados também são importantes para entender como diferentes feedbacks solo-vegetação-atmosfera podem exacerbar o futuro esperado mais quente e condições mais secas nesta região.

Os resultados deste estudo têm um impacto significativo na nossa compreensão de trocas contínuas solo-planta-atmosfera no Bioma Caatinga e as conseqüências ambientais da degradação do solo em terras secas. Como resultado, enfatiza-se a urgência de ações de conservação, fornecendo diretrizes gerais para planejamento, gerenciamento e esforços de monitoramento que podem mitigar os efeitos da perturbação.

3.5 CONCLUSÕES

Este estudo investigou o efeito da degradação do bioma Caatinga sobre as trocas de água e carbono no semiárido brasileiro. Esse é o primeiro estudo analisando e relacionando os fluxos de carbono em áreas com diferentes estágios de degradação do solo induzida pelo homem neste bioma. Foi observado que a Caatinga esparsa teve evapotranspiração anual maior que a Caatinga densa, correspondendo a uma média de 90% da precipitação total anual, enquanto a Caatinga densa utilizou cerca de 74%. Conseqüentemente, o desmatamento da Caatinga contribui para a intensificação da evapotranspiração (pela perda de água do solo) e a redução do potencial de fixação do carbono atmosférico, reduzindo a capacidade desta STDF em mitigar os efeitos da crescente concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Além disso, as duas

áreas atuaram como sumidouro de carbono, absorvendo em média 50% e 34% do carbono fixo total para as áreas da Caatinga densa e esparsa, respectivamente. Como esperado, o desmatamento do bioma Caatinga reduz a capacidade do ecossistema em absorver CO₂ e modifica o microclima, impactando o ambiente local e o orçamento regional de carbono. Esses achados fornecem um melhor entendimento de como os diferentes tipos de degradação nesta região única podem afetar as condições mais quentes e secas esperadas da Caatinga nos anos a vir.

4 CAPÍTULO IV - AVALIAÇÃO BASEADA EM SENSORIAMENTO REMOTO DA DEGRADAÇÃO DO SOLO E IMPACTOS DA SECA SOBRE OS ECOSISTEMAS TERRESTRES NO NORDESTE DO BRASIL²

RESUMO

A avaliação espaço-temporal dos fluxos de água e carbono na região Nordeste do Brasil (NEB) permite uma melhor compreensão desses padrões de fluxo superficial em áreas com diferentes fisionomias vegetais. O NEB é dividido em quatro biomas: Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. A degradação do solo é um problema crescente, particularmente em áreas suscetíveis do bioma Caatinga, como a Floresta Tropical Sazonalmente Seca (SDTF - *Seasonally Dry Tropical Forest*). Além disso, esta região experimentou impactos climáticos, como secas severas. Devido à crescente pressão humana, a cobertura das terras naturais da Caatinga sofreu mudanças drásticas, tornando-se uma região particularmente vulnerável à desertificação. Neste estudo, estimativas do Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) da evapotranspiração (ET) e produção primária bruta (GPP - *Gross Primary Production*) foram validadas em duas áreas contrastantes, Caatinga densa (DC - *Dense Caatinga*) e Caatinga esparsa (SC - *Sparse Caatinga*), usando dados de covariância de vórtices (EC - *Eddy Covariance*) e, em seguida, investigou seu comportamento ao longo de 21 anos (2000-2020) para o NEB. Produtos MODIS explicaram 60% das variações em ET e GPP, mostrando maior precisão na Caatinga densa, enquanto as áreas de Caatinga esparsa apresentaram a menor GPP, indicando que a degradação do solo reduziu a atividade fotossintética da vegetação nesta área. Com base na análise da ET e GPP ao longo de 21 anos, observamos uma maior dependência da Caatinga esparsa sobre a variabilidade climática, demonstrando uma maior resiliência da Caatinga densa aos efeitos climáticos. Em comparação com os demais biomas da região do NEB, encontramos as menores médias da ET e GPP no bioma Caatinga, semelhante aos valores encontrados na Caatinga esparsa. Em áreas florestais, semelhantes a DC monitorada, permitiram que a Caatinga se comportasse mais próxima dos demais biomas presentes na região.

Palavras-chave: Caatinga; evapotranspiração; balanço de carbono; Eddy covariance.

² Artigo publicado em 2022 na “Science of the Total Environment”. Link: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155490>

4.1 INTRODUÇÃO

O estudo dos fluxos de água e carbono sobre ecossistemas específicos permite aos pesquisadores buscar entender os diferentes padrões da vegetação, como distribuição de espécies ou efeitos da degradação induzida pelo homem (LU e ZHUANG, 2010; ITO e INATOMI, 2012). Além disso, é importante para desenvolver melhor modelos e previsões futuras (KOHONEN et al., 2022). Os fluxos de água são quantificados considerando os fluxos que entram no sistema (precipitação) e os fluxos que saem do sistema (evapotranspiração, ou ET). ET é o transporte de vapor de água no contínuo solo-planta-atmosfera induzido pela interação de dois processos: evaporação da superfície do solo e água e transpiração das plantas. Como resultado, ET é fundamental para o sistema climático da Terra, pois vincula os ciclos de energia, água e carbono (ANDERSON et al., 2012; ZHANG et al., 2016; FISHER et al., 2017).

Identificar fontes e sumidouros de carbono terrestre é fundamental para entender o sistema terrestre, bem como a mitigação e adaptação a variações climáticas resultante, por exemplo, das emissões de gases de efeito estufa (SMALLMAN et al., 2021). Uma maneira de avaliar os fluxos de carbono em áreas com vegetação é analisar a produção primária bruta (GPP). GPP é uma componente do ciclo global de carbono formado durante o processo de fotossíntese devido à quantidade de carbono assimilado pela vegetação (SCHIMMEL, 1995; BEER et al., 2010; HUANG et al., 2019). Este processo remove cerca de 30% das emissões antropogênicas anuais de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera (LUO et al., 2015; FRIEDLINGSTEIN et al., 2020). GPP está fortemente ligada a ET (MARQUES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021), e estimativas precisas dessas variáveis nos ajudam a entender os padrões do ciclo da água e do carbono em muitos ecossistemas terrestres (SMITH et al., 2016; LI et al., 2018).

A técnica de correlações turbulentas, também conhecida como EC, é amplamente utilizada para medir esses fluxos. A técnica EC foi aplicada com sucesso para observar as trocas de fluxos de água e carbono entre a atmosfera da Terra e a biosfera (ALVAREZ-TABOADA et al., 2015; XIN et al., 2017; ZHU et al., 2018; HUANG et al., 2019). Apesar da alta precisão desses fluxos estimados, a técnica é inviável para análise em grandes áreas devido aos custos relacionados à instalação, operação e manutenção. Como resultado, apenas algumas áreas têm uma ampla distribuição espacial de torres para obter esses fluxos em escalas maiores. Assim, dados de sensoriamento remoto orbital (SR) tornaram-se cada vez mais populares nos últimos

anos para superar a escassez de dados de campo (DE OLIVEIRA et al., 2017; LAIPELT et al., 2021; LI et al., 2021). A adoção de modelos baseados em SR para estimar ET e GPP em grandes áreas está se tornando mais comum, e os dados obtidos das torres de fluxo servem para validar o desempenho de diferentes modelos físicos e empíricos (WANG et al., 2013; DE OLIVEIRA et al., 2017; QIU et al., 2020; HUANG et al., 2021).

Um dos conjuntos de dados de SR mais comumente usados são os do Espectroradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS), que usa suposições simplificadas em algoritmos para descrever os processos dos ciclos da água e do carbono em diferentes ecossistemas terrestres (WU et al., 2011; ZHU et al., 2018). MODIS fornece dados ET (MOD16A2) e GPP (MOD17A2H) em composições de 8 dias com resolução espacial de 500 m (RUNNING et al., 2015, 2017). Embora os produtos MODIS tenham sido amplamente validados usando torres EC distribuídas na América e Europa (GEBREMICHAEL e BARROS, 2006; ZHAO et al., 2006; YANG et al., 2007; CHASME et al., 2009; COOPS et al., 2009; MU et al., 2011; WANG et al., 2013), eles não foram validados para o bioma Caatinga na região Nordeste do Brasil (NEB). A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro com heterogeneidade da vegetação, e apenas alguns estudos de avaliação e validação desses conjuntos de dados podem ser encontrados (FERREIRA et al., 2021).

É essencial destacar que o bioma Caatinga é considerado uma região tropical sazonalmente seca Floresta (SDTF). Embora menos estudada do que as florestas tropicais, tem uma influência significativa no balanço global de CO₂ (SANTOS et al., 2014), com alto potencial de armazenamento de carbono devido à alta atividade fotossintética da vegetação quando a água é abundante (SILVA et al., 2017; MENDES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021). Apesar de sua biodiversidade e potencial de absorção de carbono, esta região enfrenta mudanças na cobertura do solo como resultado de intensas atividades induzidas pelo homem, principalmente desmatamento e queimadas (práticas de corte e queima), para substituir vegetação natural por pastagens (SANTOS et al., 2014; KOCH et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2021a, 2021b). Práticas de pastoreio intensivo também podem acelerar o processo de degradação do solo. Os efeitos a longo prazo do pastoreio sobre propriedades biológicas, físicas e químicas permanecem pouco compreendidas, especialmente em SDTF, como o bioma Caatinga (OLIVEIRA et al., 2021a, 2021b). O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 2021 alerta para as mudanças climáticas causadas por ações humanas diretas e destrutivas sobre o meio ambiente, enfatizando a necessidade crítica de reduzir emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2021). Projeções do IPCC para o

NEB mostram uma diminuição de 30% na precipitação e um aumento de 3 a 4 °C na temperatura, agravando o processo de desertificação nesta região, particularmente em áreas mais áreas vulneráveis, como o bioma Caatinga.

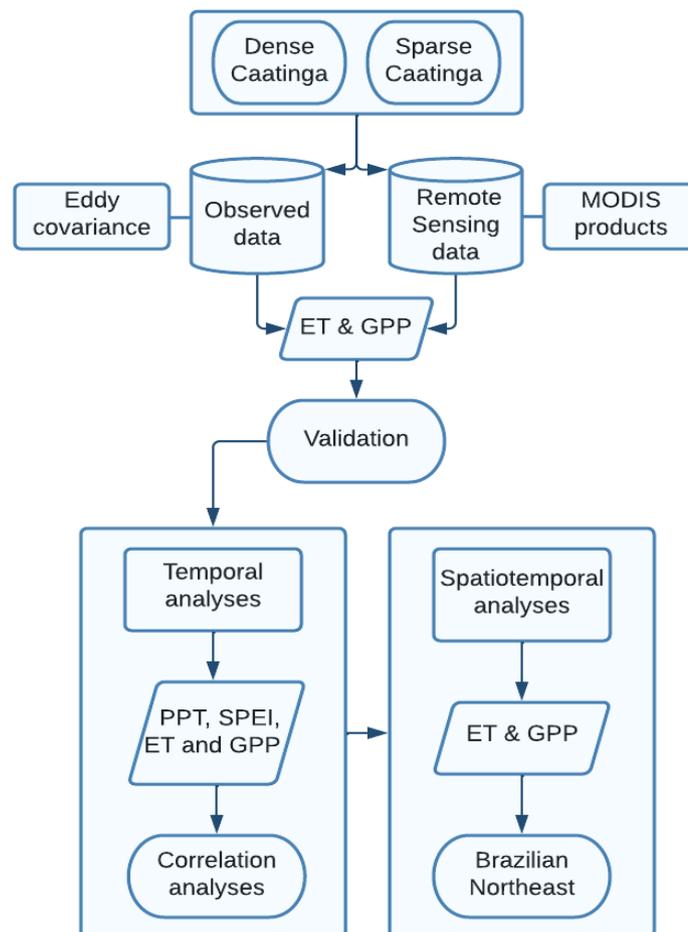
Neste estudo, hipotetizamos que a validação dos produtos MODIS ET e GPP em regiões estratégicas do bioma Caatinga ajudará a entender o comportamento do modelo em diferentes densidades de cobertura vegetal e, avaliações em áreas onde ocorreram processos de degradação do solo. Além disso, com a validação desses modelos, será possível analisar uma longa série histórica (por exemplo, de 2000 até o presente), permitindo análises espaço-temporais de fluxos de água e carbono. Com base nas considerações acima, os objetivos deste capítulo são (i) validar os produtos MOD16A2 e MOD17A2H para duas áreas contrastantes da Caatinga e (ii) investigar os padrões desses fluxos ao longo de 21 anos (2000 - 2020). Por fim, comparamos as magnitudes e a sazonalidade da GPP e ET entre a região do NEB e os quatro principais biomas brasileiros (Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

O estudo está dividido em duas partes: (i) validação dos produtos MODIS ET E GPP a partir de estimativas baseadas em medições de EC no bioma Caatinga; e (ii) comparações espaço-temporais dos fluxos de água e carbono no NEB, incluindo os biomas Mata Atlântica, Amazônia, Cerrado e Caatinga. A Figura 10 representa o fluxograma da metodologia. O NEB é composto pelos estados da Bahia (BA), Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Ceará (CE), Piauí (PI) e Maranhão (MA) (Figura 11B).

Figura 10 - Fluxograma metodológico do estudo,

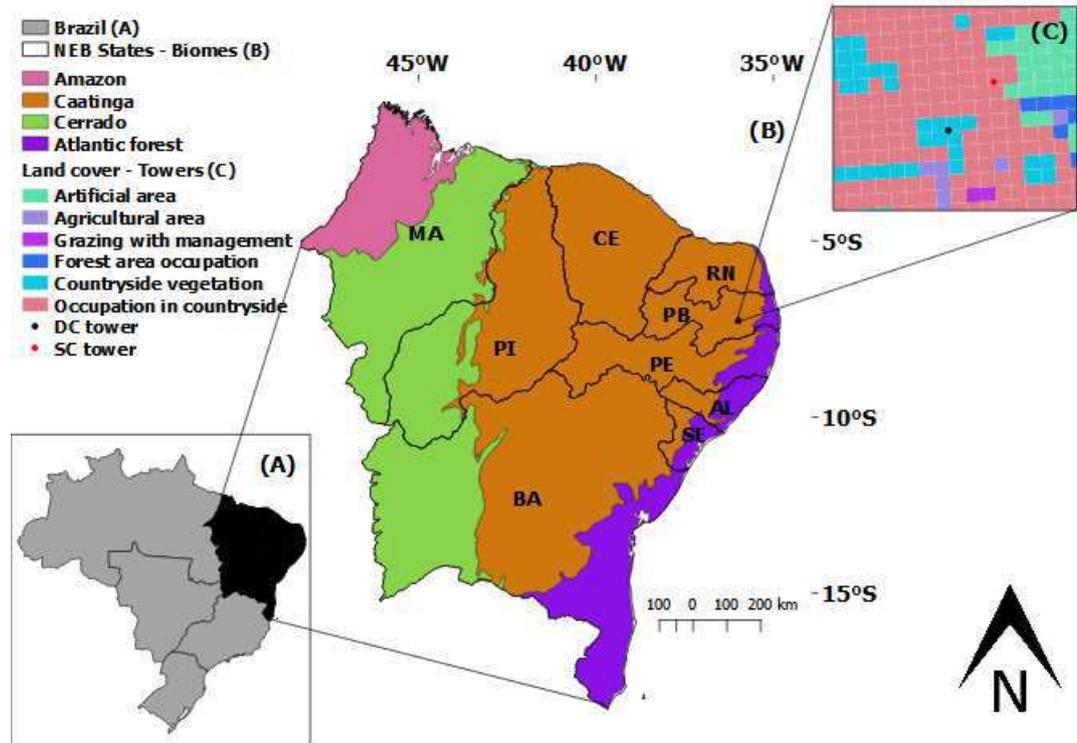


Fonte: Elaboração Própria

A validação dos produtos MODIS foi realizada em dois tipos de cobertura do solo com diferentes densidades de vegetação no bioma Caatinga, onde estão instaladas as torres EC (BORGES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021). Essas áreas estão localizadas no município de Campina Grande, Estado da Paraíba (Figura 11C). A primeira área é um fragmento de Caatinga em recuperação (vegetação densa, doravante denominada “DC”). Nos últimos 80 anos, a área do DC vem passando por regeneração, com áreas de vegetação arbórea e arbustiva em aproximadamente 300 ha de vegetação heterogênea. A segunda área (vegetação esparsa, doravante denominada “SC”) é considerada degradada, com árvores atingindo aproximadamente 2 m de altura e apresentando uma alta porcentagem de solo nu e afloramentos rochosos (BORGES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021). A Figura 11C mostra as duas áreas (DC e SC) localizadas no município de Campina Grande.

Os processos de degradação nesses locais estão ligados a fatores edáficos, climáticos e de ocupação e uso do solo (PEREZ-MARIN et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2021a, 2021b). Além disso, o uso insustentável de recursos naturais e técnicas agrícolas e o modelo de desenvolvimento econômico ineficazes são ações antrópicas que aceleram o processo de degradação dessas áreas. No geral, o desmatamento e a consequente substituição da vegetação natural por outras culturas anuais de diversos tamanhos e/ou ciclos de vida iniciam os processos de degradação nesta região (PEREZ-MARIN et al., 2006; VIEIRA et al., 2020). Pastagens herbáceas ou cultivos de ciclo curto comumente substituem a vegetação arbustiva e arbórea da Caatinga.

Figura 11 - Região Nordeste do Brasil (NEB) (A), biomas do NEB (B) e cobertura do solo das áreas DC e SC (C).



Fonte: Elaboração Própria

4.2.2 Dados micrometeorológicos

A localização espacial das duas torres de fluxo pode ser vista na Figura 11C. Oliveira et al. (2021) mostram a descrição detalhada dos equipamentos e processamento dos dados. O período utilizado para validar os dados de sensoriamento remoto foi de março de 2013 a dezembro de 2016 para ET e GPP. O período de estudo foi selecionado considerando a disponibilidade de dados simultâneos em ambas as torres.

O sistema EC consiste em um anemômetro sônico 3D (CSAT3A, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) e um analisador de gás (EC, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) usado para medir as três componentes da velocidade do vento (u_x , u_y , u_z), concentrações de vapor de água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2), respectivamente. De acordo com Oliveira et al. (2021), as medidas foram feitas na frequência de 10 Hz e registradas em um *datalogger* modelo CR3000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) em intervalos de 30 minutos.

4.2.3 Dados de sensoriamento remoto orbital

Foram utilizados os produtos MODIS ET (MOD16A2) e GPP (MOD17A2H) versão 6 (RUNNING et al., 2015; 2017). O produto MOD16A2 usa a equação de Penman-Monteith, incluindo dados de reanálise de sensoriamento remoto MODIS como entrada (RUNNING et al., 2017). Os produtos são acessíveis em composição de 8 dias com resolução espacial de 500 m. O produto MOD17A2H usa Tabelas de Pesquisa de Propriedades do Bioma (BPLUT - *Biome Property Lookup Tables*) atualizadas, e uma versão atualizada dos dados climáticos diários do Escritório Global de Modelagem e Assimilação (GMAO - *Global Modeling and Assimilation Office*) (KNOWLAND et al., 2021). Eles também são gerados com resolução espacial de 500 m (RUNNING et al., 2015). As estimativas MOD16A2 e MOD17A2H foram extraídas dentro de um buffer de 1 km ao redor das torres para cada área, o que corresponde a uma janela de 5×5 pixels. A média dos pixels extraídos foi calculada e a escala fatorial foi corrigida de acordo com o produto obtido, conforme descrito no guia do usuário MODIS (RUNNING et al., 2015). Para validar esses produtos, os compósitos de 8 dias foram transformados em diários conforme descrito no guia do usuário MOD17. Para a análise temporal, a composição mensal do produto foi utilizada para observar a sazonalidade dos fluxos nas áreas estudadas. A série temporal utilizada para as duas áreas foi de 21 anos para GPP e 20 anos para ET devido à disponibilidade de produtos MODIS.

Para entender os padrões hidrológicos da região e aprofundar a discussão dos resultados, dados de precipitação (CHIRPS - *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station*) e índice de seca (SPEI - *Standardized precipitation evapotranspiration index*) foram obtidos. CHIRPS usa uma combinação de estimativas de precipitação baseadas em satélite e dados de campo. O algoritmo é baseado em abordagens anteriores de técnicas de interpolação "inteligentes" e alta resolução espacial ($0,05^\circ$; $\sim 5\text{km}$) (FUNK et al., 2015, BRITO et al., 2021). O produto UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY foi utilizado para obter a precipitação total anual de 21 anos (2000 – 2020) e PPT média anual para o NEB. A extração de dados foi realizada usando o *Google Earth Engine* (GEE) (disponível em <https://code.earthengine.google.com/>).

Os dados do SPEI foram coletados do *SPEI Global Drought Monitor* (<http://spei.csic.es/>) para determinar os ciclos normal, úmido e seco. SPEI fornece informações quase em tempo real sobre as condições de seca globalmente, com resolução espacial de 1 grau e temporal mensal. O SPEI tem uma escala de tempo que varia de 1 a 48 meses (Beguería et

al., 2010). O SPEI *Global Drought Monitor* é baseado na equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial (PET). Utilizamos o SPEI-12 para o estudo, esta janela de tempo é indicada para estudos hidrológicos. O SPEI-12 representa padrões pluviométricos de longo prazo e pode oferecer uma avaliação anual das condições regionais da água (BOHN e PICCOLO, 2018). O período selecionado foi de 21 anos (2000 - 2020). O processamento dos dados de sensoriamento remoto para as análises espaço-temporais no NEB foi realizado por meio da plataforma web GEE, e os produtos MOD16A2 e MOD17A2H foram usados para obter os fluxos ET e GPP de longo prazo para toda a região.

4.2.4 Análise de dados

O fluxo de trabalho segue estas etapas: (1) validação dos produtos MODIS (MOD16A2 e MOD17A2H) para as duas áreas (DC e SC); (2) análises temporais ao longo de 21 anos (2000 – 2020) de ET, GPP, PPT e SPEI nas duas áreas (DC e SC); (3) Correlações de Pearson entre as variáveis analisadas (ET, GPP, PPT e SPEI); e (4) análises espaço-temporais de ET e GPP para o NEB.

Quatro índices foram utilizados para validar a precisão das estimativas dos produtos MODIS: coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Equação 8), erro relativo médio absoluto (MARE) (Equação 9) e BIAS (Equação 10):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x_{obs} - x_{est})^2}{n}} \quad (8)$$

$$MARE = \frac{1}{n} \sum \frac{|x_{est} - x_{obs}|}{x_{obs}} \quad (9)$$

$$BIAS = \frac{\sum(x_{obs} - x_{est})}{n} \quad (10)$$

em que X_{obs} são os dados observados das torres de fluxo (EC), X_{est} é o valor estimado do produto MODIS e n é o número de amostras. Esses métodos são frequentemente usados para

comparar duas variáveis e determinar a imprecisão dos dados (RUHOFF et al., 2013; LIU et al., 2015; DE OLIVEIRA et al., 2017; WANG et al., 2021).

4.3 RESULTADOS

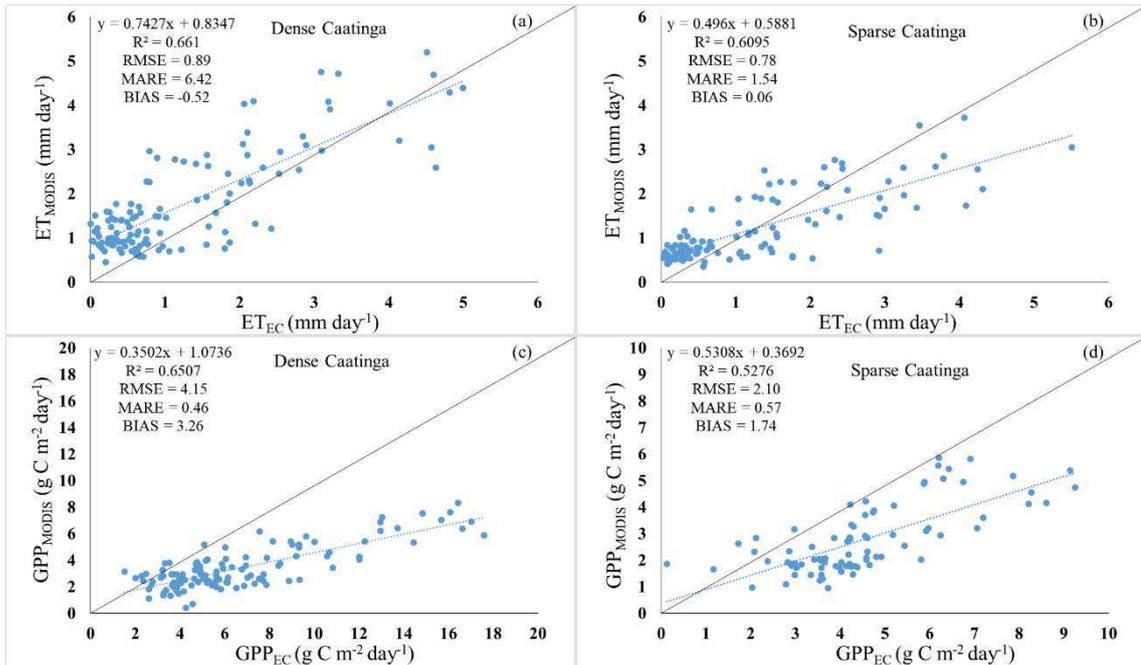
4.3.1 Validação dos produtos MODIS ET (MOD16A2) e MODIS GPP (MOD17A2H) para áreas do bioma Caatinga

Os dados de ET e GPP medidos diariamente das torres EC foram usados para validar os produtos MODIS (Fig. 12). Na área DC, um total de 123 comparações ET foram feitas (Fig. 12a), obtendo R^2 de 0,66, inclinação de 0,74, RMSE = 0,89 mm dia⁻¹, MARE = 6,42 mm dia⁻¹ e BIAS = -0,52 mm dia⁻¹. Na área SC, foram feitas 111 comparações de ET (Fig. 12b), que apresentou menores erros, mas com $R^2 = 0,61$ e uma inclinação em linha reta de 0,50. Os valores de RMSE, MARE e BIAS foram de 0,78 mm dia⁻¹, 1,54 mm dia⁻¹ e 0,06 mm dia⁻¹, respectivamente. Cento e dezessete comparações foram feitas para MODIS GPP em DC entre 2013 e 2016 (Fig. 12c). É possível observar uma subestimação do produto MODIS nesta área, com valores de R^2 , inclinação, RMSE, MARE e BIAS de 0,65, 0,35, 4,15 g C m⁻² dia⁻¹, 0,46g C m⁻² dia⁻¹ e 3,36 g C m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Para a área SC, foram feitas 84 comparações de GPP (Fig. 12d), obtendo R^2 igual a 0,53, com RMSE de 2,10 g C m⁻² dia⁻¹. A inclinação, MARE e BIAS foram 0,53, 0,57 g C m⁻² dia⁻¹ e 1,74 g C m⁻² dia⁻¹, respectivamente.

No geral, os valores de R^2 ficaram acima de 0,6, significando que os produtos MODIS explicaram aproximadamente 60% das variações de ET e GPP, exceto para GPP na área SC, que explicou 53% das variações. Os produtos MODIS apresentaram maior precisão na área DC. Os valores de erro relativo absoluto diário de GPP foram inferiores a 1 g C m⁻² dia⁻¹, com um valor médio próximo a 0,5 g C m⁻² dia⁻¹ para as duas áreas. Os resultados obtidos aqui tiveram um desempenho melhor do que estudos realizados em outros biomas do Brasil, como os de Oliveira et al. (2017) e Ruhoff (2011), apresentando valores médios de R^2 de 0,48 e 0,19, respectivamente, para áreas da região amazônica. No entanto, a região amazônica apresenta baixa sazonalidade, tornando-se desafiadora para capturar pequenas alterações. Isso pode explicar o baixo desempenho dos produtos MODIS nesta região, bem como outras limitações

dos produtos MODIS, como a resolução espacial mais baixa dos dados de reanálise e a imprecisão de dados de cobertura do solo nos produtos MOD15 e MOD12 (MU et al., 2011; RUHOFF et al., 2013).

Figura 12 - Comparações de dados observados diários (EC) com produtos MODIS: (a) MODIS ET para a área DC; (b) MODIS ET para a área SC; (c) MODIS GPP para a área DC; e (d) MODIS GPP para a área SC. A linha tracejada é a linha de tendência e a linha sólida é a referência 1:1.



Fonte: Elaboração Própria

4.3.2 Análises de longo prazo da PPT, ET e GPP nas áreas DC e SC

A série temporal mensal de longo prazo para as duas áreas com densidades contrastes no bioma Caatinga (DC e SC) são mostradas na Fig. 13. A série temporal compreende o período de 21 anos (2000 - 2020), exceto para MODIS ET, que tem dados disponíveis a partir de 2001, perfazendo uma série temporal anual de 20 anos (Fig. 13b).

Os dados mensais de precipitação cumulativa (Fig. 13a) mostram claramente a sazonalidade, com duas estações: seca e chuvosa. A Fig. 13a evidencia que as estações podem variar interanualmente em intensidade e duração. A estação seca é de agosto a fevereiro e a estação chuvosa é de março a julho (OLIVEIRA et al., 2021). Assim, é possível identificar cinco anos que teve PPT média anual próxima ou acima da média histórica (~783 mm): 2000

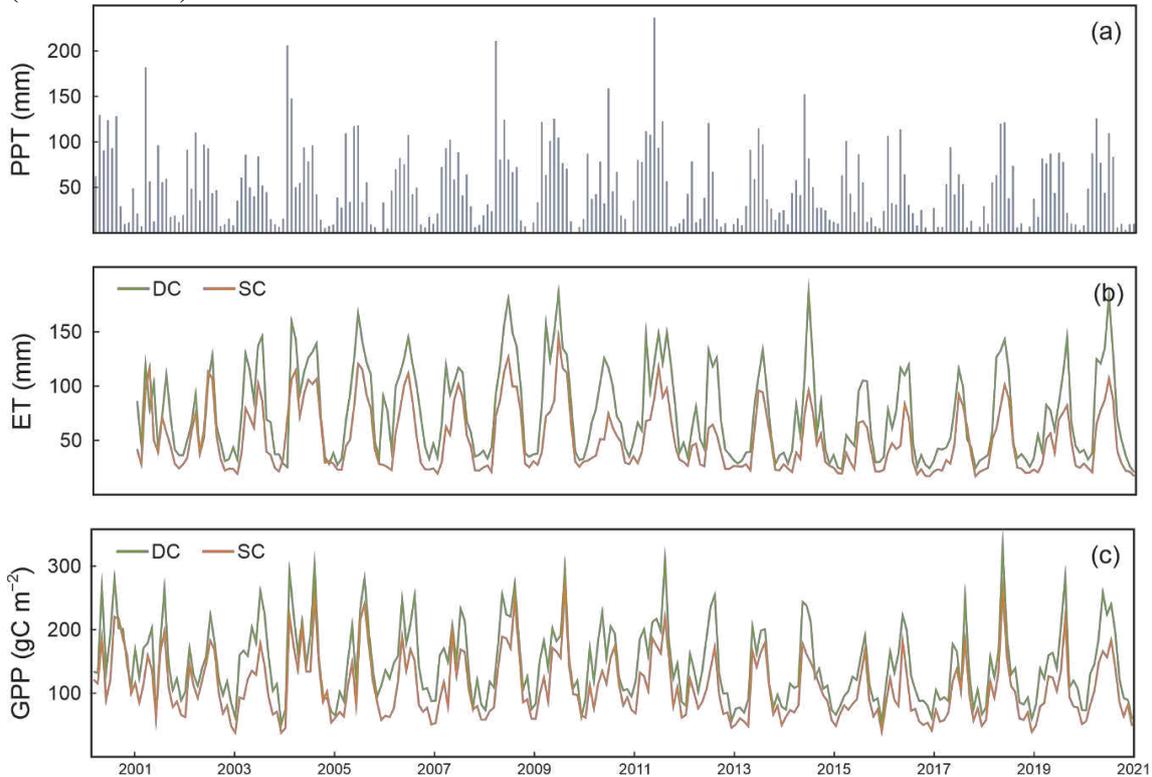
(726 mm ano⁻¹), 2004 (~806 mm ano⁻¹), 2008 (~722 mm ano⁻¹), 2009 (~731 mm ano⁻¹) e 2011 (~926 mm ano⁻¹). Os demais anos apresentaram uma PPT anual total abaixo de 620 mm ano⁻¹, com destaque para 2012 e 2017. O ano de 2012 teve uma PPT total anual de ~416 mm ano⁻¹, e 2017 teve a PPT total anual mais baixa entre os anos estudados, ou seja, ~375 mm ano⁻¹.

As Figuras 13b e c mostram o comportamento temporal das ET e GPP mensais para as duas áreas do bioma Caatinga (DC e SC). É possível observar que o comportamento sazonal da ET e GPP são semelhantes, com valores máximos na estação chuvosa e valores mínimos na estação seca. Também é possível observar que ET e GPP na área DC são maiores do que na área SC. A ET média na estação seca é de 53,35 mm mês⁻¹ (SD = 11,98 mm mês⁻¹) e 36,21 mm mês⁻¹ (SD = 9,34 mm mês⁻¹) para as áreas DC e SC, respectivamente. Na estação chuvosa, esses valores aumentam para 106,79 mm mês⁻¹ (SD = 23,37 mm mês⁻¹) e 73,24 mm mês⁻¹ (SD = 17,33 mm mês⁻¹) para as áreas DC e SC, respectivamente.

Os anos de maior ET anual coincidem com os de maior PPT anual, com 2011 apresentando a maior ET anual total na área DC de 1195,25 mm ano⁻¹, de acordo com a PPT total anual. Na área SC, a maior PPT anual foi em 2004, com 926 mm ano⁻¹, com a segunda maior PPT anual total. A média anual da ET ao longo dos 20 anos de estudo (2001 - 2020) foi de 864,16 mm ano⁻¹ (SD = 165,82 mm ano⁻¹) para a área DC e 590,21 mm ano⁻¹ (SD = 133,14 mm ano⁻¹) para a área SC. Isso esclarece que a área DC tem uma taxa de ET maior do que a área de SC.

As médias mensais da GPP na estação chuvosa são 171,59 g C m⁻² mês⁻¹ (SD = 23,24 mm mês⁻¹) na área DC e 128,40 g C m⁻² mês⁻¹ (SD = 18,75 mm mês⁻¹) na área SC. Na estação seca, esses valores caíram para 128,41 g C m⁻² mês⁻¹ (SD = 22,76 mm mês⁻¹) e 98,26 g C m⁻² mês⁻¹ (SD = 24,57 mm mês⁻¹) nas áreas DC e SC, respectivamente. A média anual acumulada da GPP para os 21 anos de estudo (2000 – 2020) foi de 1,738,97 g C m⁻² ano⁻¹ (SD = 198,14 g C m⁻² ano⁻¹) na área DC e 1313,04 g C m⁻² ano⁻¹ (SD=183,33 g C m⁻² ano⁻¹) na área SC, mostrando uma diferença na absorção de carbono de 425,94 g C m⁻² ano⁻¹ entre as duas áreas. As duas áreas apresentaram a maior GPP anual acumulada em 2011, com 2133,94 g C m⁻² ano⁻¹ e 1577,45 g C m⁻² ano⁻¹ para as áreas DC e SC, respectivamente. O ano 2011 foi também o ano que apresentou a maior GPP anual acumulada.

Figura 13 - Séries temporais de longo prazo de estimativas de PPT, ET e GPP derivadas de SR para as duas áreas (DC e SC): (a) PPT derivada do produto CHIRPS (2000 – 2020); (b) ET derivada do produto MOD16A2 (2001 – 2020); e (c) GPP derivada do produto MOD17A2H (2000 – 2020).

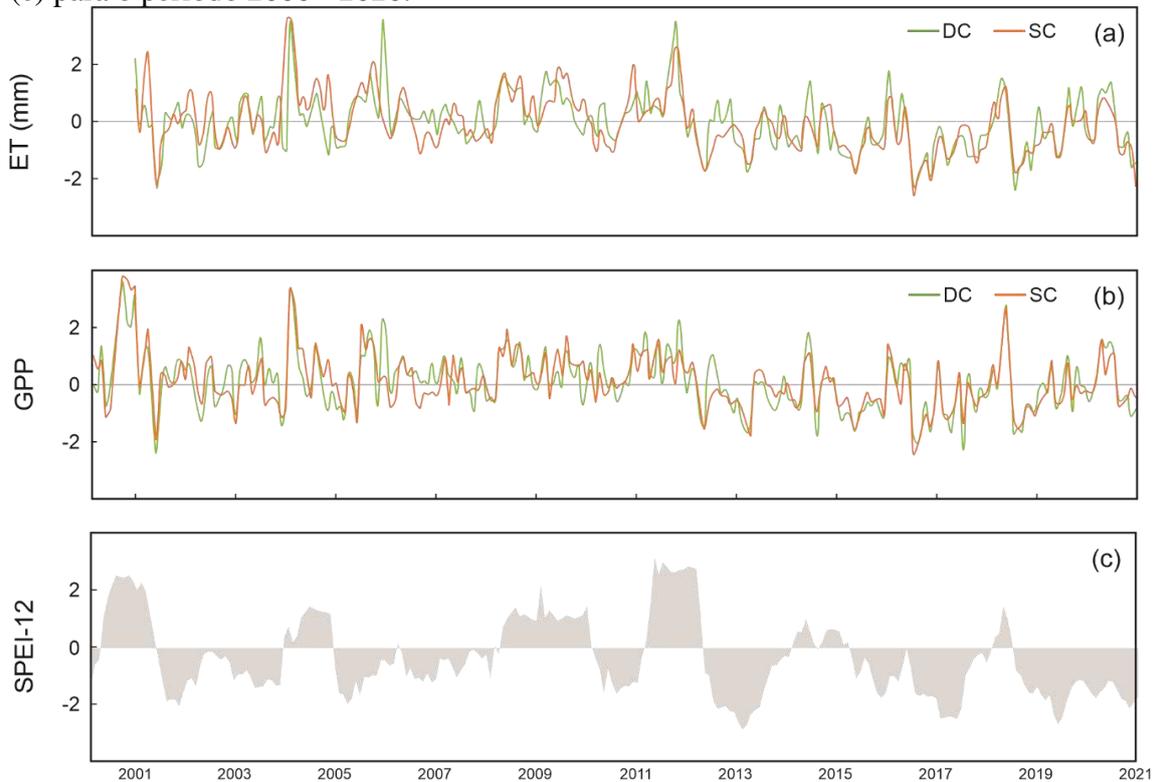


Fonte: Elaboração Própria

4.3.3 Análises de anomalias entre as variáveis ET, GPP e SPEI para as áreas DC e SC

Para entender melhor o comportamento da ET e GPP com a seca (SPEI), foram calculadas as anomalias desses fluxos para a série temporal. Os anos mais chuvosos (2000, 2004, 2008, 2009 e 2011) mostrados na Fig. 14c também foram os anos que apresentaram anomalias positivas de ET e GPP para as duas áreas de estudo. A partir de 2012, é possível constatar que a região sofreu uma estiagem prolongada, que durou até o final da série estudada, que impactou diretamente a ET e GPP, como pode ser visto nas Figuras 13a e b.

Figura 14 - Séries temporais de anomalias ET (a) e GPP (b) para as áreas DC e SC, e SPEI 12 (c) para o período 2000 - 2020.



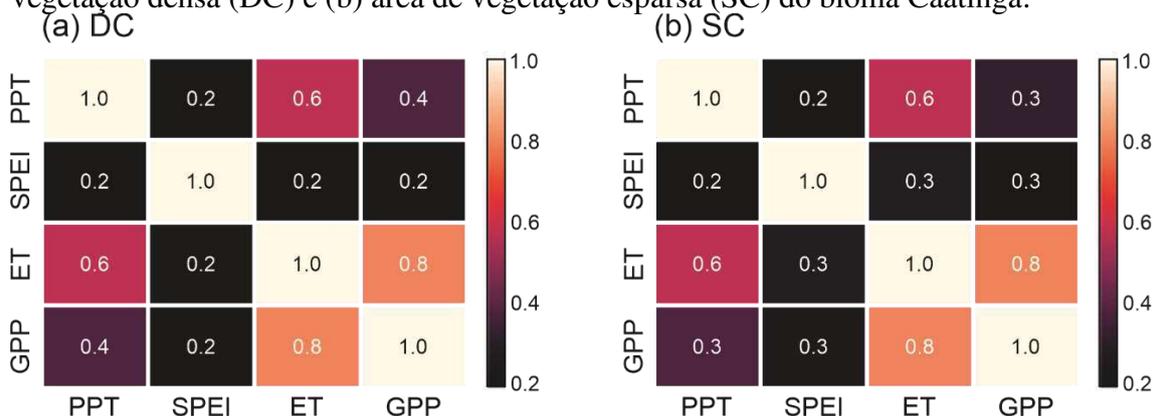
Fonte: Elaboração Própria

4.3.4 Análises de correlação das variáveis PPT, SPEI, ET e GPP nas áreas DC e SC do bioma Caatinga

A Fig. 15 ilustra a distribuição das quatro variáveis (PPT, SPEI, ET e GPP) obtido por SR para as duas áreas com densidade contrastante de cobertura do solo (DC e SC) no bioma Caatinga. ET e GPP mostraram forte correlação para ambas as áreas, chegando a um valor de 0,8. Mudanças climáticas e atividades humanas impactam significativamente ET e GPP (CHEN et al., 2017; XIE et al., 2020). Um dos principais impactos é o fechamento e abertura dos estômatos em resposta ao CO₂ atmosférico, afetando a transpiração do dossel e fotossíntese (PIAO et al., 2015). No entanto, além dos fatores climáticos (PPT, temperatura e radiação solar incidente), a fisiologia da vegetação influencia a fixação de CO₂ e ET (OLIVEIRA et al., 2021). Conseqüentemente, a correlação entre ET e GPP foi mais forte do que os fatores climáticos (PPT).

PPT foi mais correlacionada com ET do que com GPP, mostrando uma correlação de 0,6 com ET para ambas as áreas e 0,4 e 0,3 com GPP para as áreas DC e SC, respectivamente. O SPEI apresentou correlação fraca com todas as variáveis, mostrando uma correlação de 0,2 com todas as variáveis na área DC e 0,3 com as variáveis GPP e ET na área SC, e 0,2 com a PPT na mesma área.

Figura 15 - Matrizes de correlação das variáveis PPT, SPEI, ET e GPP para: (a) área de vegetação densa (DC) e (b) área de vegetação esparsa (SC) do bioma Caatinga.



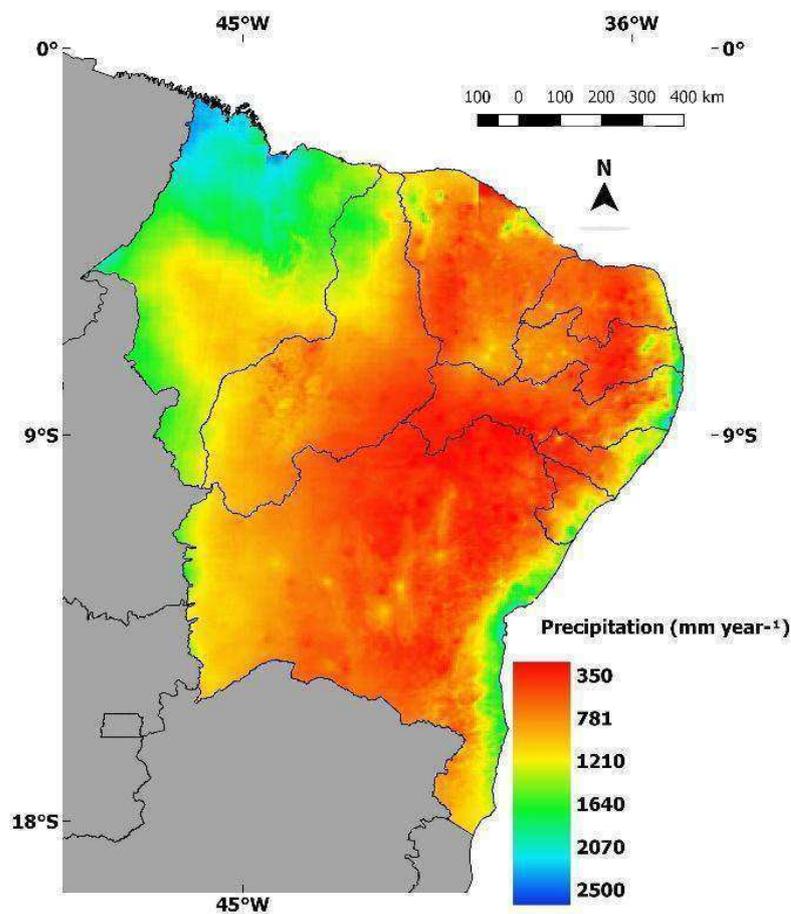
Fonte: Elaboração Própria

4.3.5 Análises espaço-temporais da ET e GPP para o NEB

Para entender melhor os fluxos de água e carbono ao longo de diferentes coberturas do solo, expandimos nossa análise para o nível regional. Utilizando a plataforma GEE foi possível gerar distribuições espaciais da ET e GPP anual através dos produtos MOD16A2 e MOD17A2H, respectivamente. Além disso, geramos um mapa da precipitação média anual entre os anos 2000 e 2020 derivado dos dados CHIRPS (Fig. 16). O NEB foi definido como o recorte para a análise espacial, por ser uma região sensível às mudanças climáticas e altamente suscetível à degradação do solo devido a fatores ambientais e antropogênicos (OYAMA e NOBRE, 2004; MARIANO et al., 2018; SANTOS et al., 2020). Além disso, é a região semiárida mais populosa no mundo (MARENGO et al., 2017b), com predominância do bioma Caatinga (52,5%) (MARIANO et al., 2018), que é o foco do presente estudo. Além do bioma Caatinga, é possível analisar e comparar o comportamento desses fluxos com outros biomas brasileiros na mesma região, como o Cerrado, a Mata Atlântica e Amazônia.

A distribuição média anual da PPT obtida através do CHIRPS entre os anos 2000 e 2020 para NEB são mostrados na Fig. 16. A PPT varia entre 350 e 2500 mm ano⁻¹, com valores mais elevados no Norte do estado do Maranhão e litoral do NEB, onde os biomas Amazônia e Mata Atlântica estão localizados. Valores intermediários da PPT foram observados no bioma Cerrado e na faixa de transição entre os biomas Mata Atlântica e Caatinga. A Caatinga foi o bioma que apresentou os menores valores de PPT, abaixo de 500 mm ano⁻¹.

Figura 16 - Precipitação média anual para o NEB (2000 – 2020) com base nas estimativas do CHIRPS.

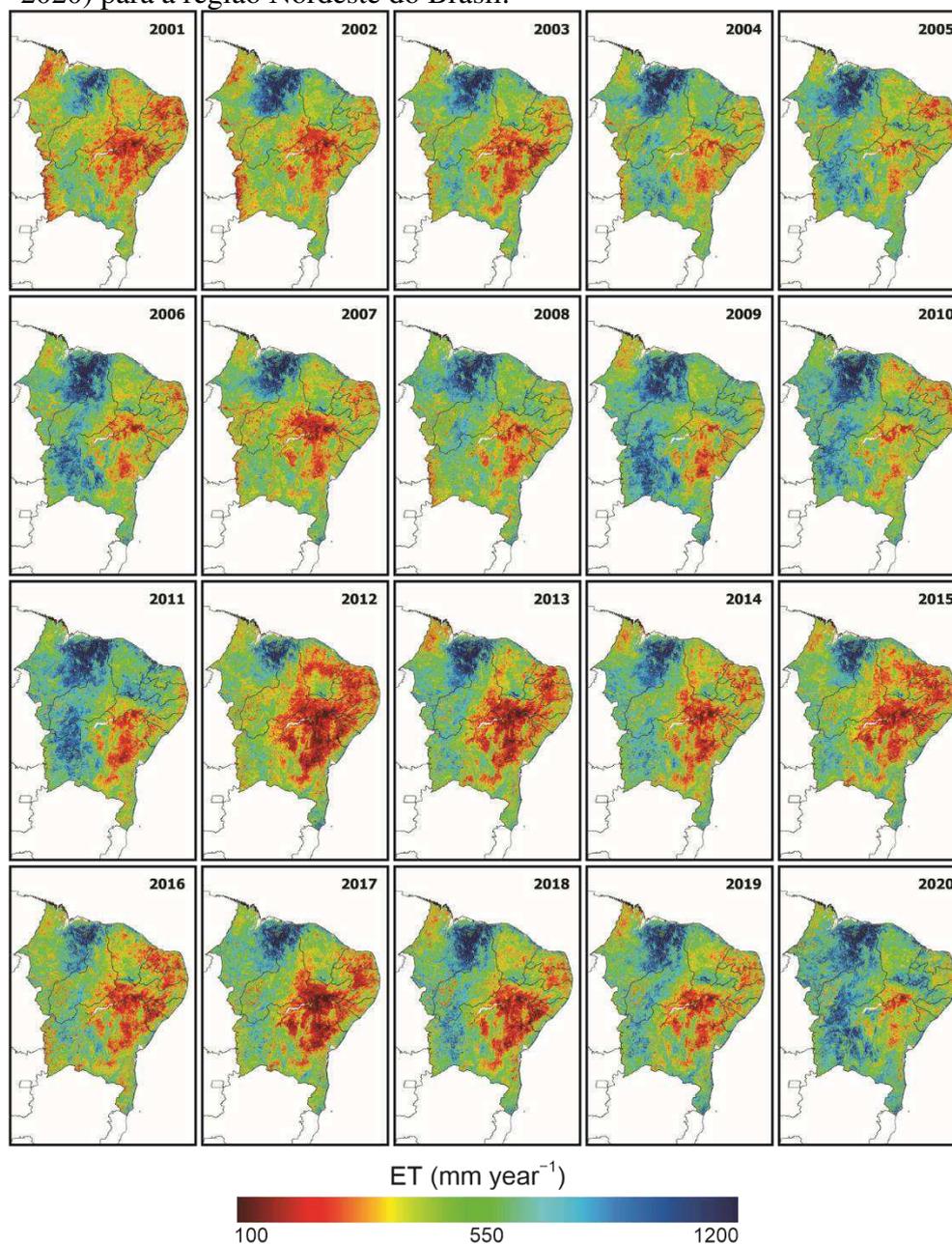


Fonte: Elaboração Própria

A distribuição espacial da ET anual obtida a partir do produto MOD16A2 para os anos estudados (2001 - 2020) no NEB é mostrada na Fig. 17. A ET anual variou de 100 a 1200 mm ano⁻¹, com maiores valores da ET na parte norte da região, onde estão localizados os estados do Maranhão e Piauí. Esses altos valores também são observados na Fig. 18 (média anual da ET por biomas). Esses altos valores da ET são vistos no bioma Cerrado, que abrange o sul do estado

do Maranhão e o oeste do estado do Piauí e Bahia (Fig. 11), atingindo valores próximos a 1200 mm ano^{-1} . Júnior et al. (2019) avaliaram a ET na zona de transição Cerrado-Amazônia, identificando altos valores da ET no bioma Cerrado. A parte central do NEB, que abrange o bioma Caatinga, teve valores baixos da ET, atingindo valores próximos a 100 mm ano^{-1} . Esses valores podem ser explicados pela disponibilidade hídrica na região (Fig. 16). Baixas taxas da ET anual no bioma Caatinga também foram identificadas por Marques et al. (2020) e Oliveira et al. (2021), com ET em anos secos próximo a 280 mm ano^{-1} .

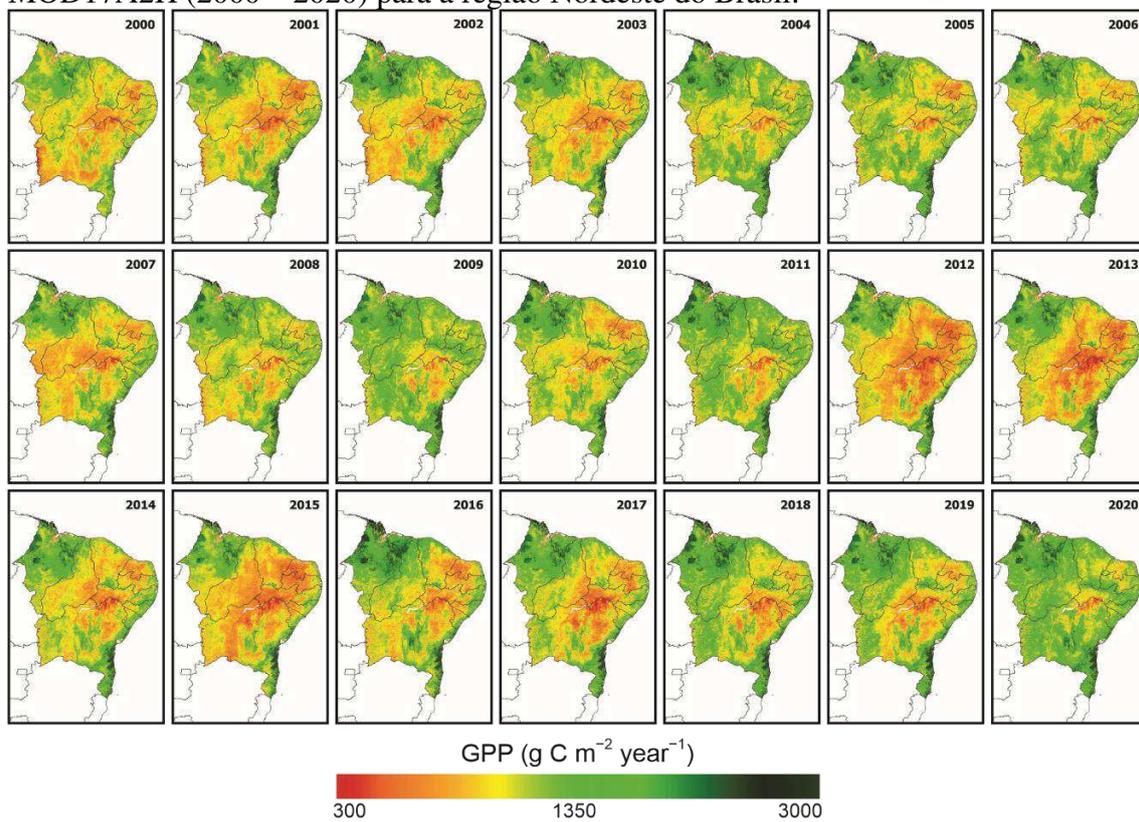
Figura 17 - Mapas de evapotranspiração média anual (ET) derivados do produto MOD16A2 (2001 – 2020) para a região Nordeste do Brasil.



Fonte: Elaboração Própria

Os mapas cumulativos anuais da GPP são mostrados na Fig. 18. Valores de GPP variaram de 300 a ~ 3000 g C m⁻² ano⁻¹, com a parte central do NEB mostrando valores mínimos de GPP, com mais evidência para a parte norte da Bahia, que apresenta valores de GPP muito baixos para todo o período estudado. Essas áreas com baixos valores de GPP foram identificadas como áreas de pastagem, de acordo com os mapas de cobertura do solo disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2021). Além disso, é possível observar que a seca iniciada em 2012 também afetou a GPP, que é também o ano que apresentou os menores valores de GPP de toda a região. Como resultado, a redução da GPP durante a estação seca ocorreu como previsto, conforme confirmado por outros estudos regionais como Ferreira et al. (2021) e Oliveira et al. (2021).

Figura 18 - Mapas de Produção Primária Bruta média anual (GPP) derivados do produto MOD17A2H (2000 – 2020) para a região Nordeste do Brasil.

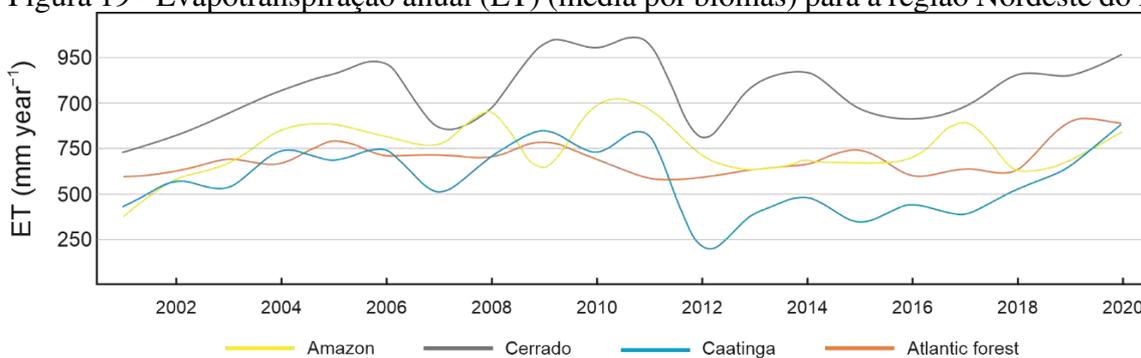


Fonte: Elaboração Própria

4.3.6 ET e GPP por biomas no NEB

As taxas anuais de ET e GPP separadas por biomas (média por bioma) são mostradas nas Figuras 19 e 20, respectivamente. O Cerrado apresentou taxas de ET muito superior aos demais biomas, atingindo um valor máximo de 834 mm ano^{-1} em 2011, com média anual de 725 mm ano^{-1} . Os outros biomas do NEB tiveram médias anuais semelhantes, entre 530 e 598 mm ano^{-1} . O bioma Caatinga apresentou valor mínimo de ET de 383 mm ano^{-1} em 2012, mostrando a menor ET da região durante o período do estudo.

Figura 19 - Evapotranspiração anual (ET) (média por biomas) para a região Nordeste do Brasil.



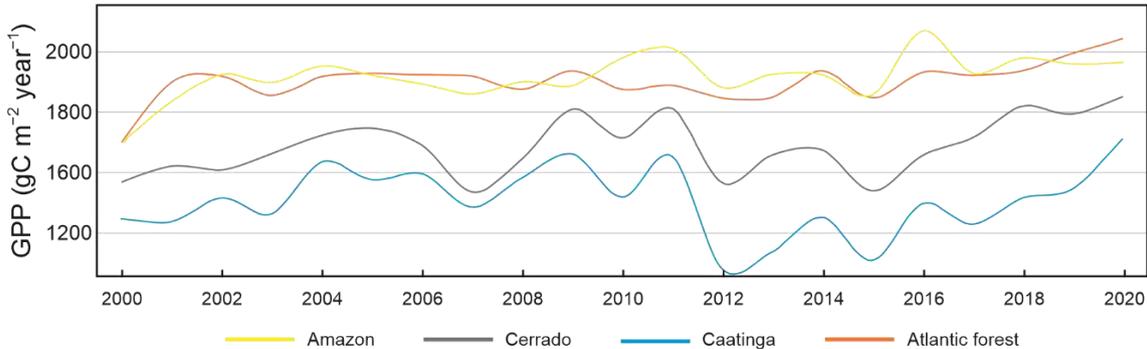
Fonte: Elaboração Própria

A GPP média anual por biomas é mostrada na Fig.20. A média anual da GPP para NEB durante o período de estudo foi de $1666 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, com Amazônia apresentando a maior média anual de $1886 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e um valor máximo de $2090 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em 2016. O bioma Mata Atlântica apresentou valores de GPP muito próximos ao bioma Amazônia, exceto em 2011 e 2016, onde a Amazônia apresentou valores de GPP acima de $2000 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Além disso, a Mata Atlântica foi o bioma que apresentou as menores oscilações em seus valores anuais de GPP. Mata Atlântica e Amazônia apresentaram valores anuais acima de $1800 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, exceto para 2000, quando os dois biomas apresentaram valores próximos a $1600 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Fig. 20). Esses dois biomas são florestas densas com alta capacidade de taxa fotossintética e, conseqüentemente, maior fixação de CO_2 (MENDES et al., 2021).

O bioma Caatinga apresentou os menores valores de GPP para todo o período de estudo, com uma média de $1337 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e um valor mínimo de $1036 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em 2012, ano em que também apresentou queda nesses valores para os demais biomas. Esses resultados

evidenciam a relação entre GPP e disponibilidade hídrica na região, principalmente em áreas com maior extensão do bioma Caatinga.

Figura 20 - Produção Primária Bruta anual (GPP) (média por biomas) para a região Nordeste do Brasil.



Fonte: Elaboração Própria

4.4 DISCUSSÃO

4.4.1 Validação

Embora MODIS ET tenha superestimado os dados observados nas duas áreas locais (Figuras 12a e b), a superestimação do MOD16 também foi encontrada em outros estudos, incluindo os de Ruhoff et al. (2013), de Oliveira et al. (2017), e Li et al. (2021). O comportamento da ET nestas áreas pode estar associado ao erro de classificação do MOD12Q1, o que resulta em estimativas de LAI (*Leaf Area Index*) e, conseqüentemente, ET (RUHOFF et al., 2013). Além disso, a maior parte da vegetação da Caatinga no NEB é classificada erroneamente no MCD12Q1 como vegetação campestre, levando à seleção errada da Tabela de Pesquisa de Propriedades do Bioma (BPLUT). O produto MODIS GPP subestimou os dados observados para as duas áreas de estudo. Em seus estudos, de Oliveira et al. (2017) também apresentaram a subestimação do produto MODIS nas estimativas de GPP para áreas do bioma Amazônia no Pará, Brasil. Wang et al. (2013) mostraram que o MODIS GPP subestimou aproximadamente 70% dos dados do EC em áreas do norte da China. É importante observar que os produtos MODIS tiveram melhor desempenho na área preservada (DC). Estudos de Ruhoff (2011) e de Oliveira et al. (2017) também mostraram melhores desempenhos dos

produtos MODIS em áreas com cobertura vegetal densa. Como resultado, hipotetizamos que está relacionado ao fato de que o algoritmo MODIS LAI tem maior precisão sobre vegetação densa e em áreas com menor influência do solo, o que precisa ser mais abordado.

4.4.2 Análises temporais no bioma Caatinga

Analisando a Fig. 13, observamos que 2015 apresentou as menores taxas de ET e GPP em ambas as áreas, e a precipitação ficou abaixo da média (447,1 mm ano⁻¹), indicando a relação de ET e GPP com a disponibilidade de água na região. Também é possível observar através das Figuras 13b e c que ET e GPP apresentaram maiores diferenças entre as duas áreas (DC e SC) na estação chuvosa, atingindo valores semelhantes na estação seca.

As variações temporais de ET e GPP foram maiores na estação chuvosa, especialmente na região da Caatinga preservada (DC). Os valores mais baixos de GPP são identificados em áreas com algum tipo de atividade antrópica (SC). Esse padrão era esperado, uma vez que a degradação causa mudanças na fisiologia da vegetação, reduzindo os estratos de vegetação e o índice de área foliar, e conseqüentemente, a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR) (MORAIS et al., 2017).

Nossas descobertas permitem identificar potenciais impactos sobre os ciclos de água e carbono causados por mudanças na vegetação devido à atividade humana no bioma Caatinga. Além disso, as mudanças no uso do solo associadas as condições climáticas da região, como secas intensas, que impulsionam o processo de desertificação, considerando que a degradação geralmente é desencadeada pela remoção da cobertura vegetal natural (VIEIRA et al., 2020). Como são áreas sensíveis propensas à desertificação, esses processos combinados podem se tornar irreversíveis, impactando o clima da região e o nexo de energia e disponibilidade de água.

A partir de 2012, as taxas de ET e GPP apresentaram anomalias negativas na maior parte da série temporal (Fig. 14), indicando que a precipitação é o principal fator de anomalias ET e GPP. Esses resultados concordam com Mariano et al. (2018), que encontraram a precipitação como o principal fator nas anomalias de ET no NEB.

Com relação à análise de correlações das variáveis PPT, SPEI, ET e GPP nas áreas DC e SC do bioma Caatinga (Fig. 15), as duas áreas apresentaram valores de correlação

semelhantes, exceto para PPT versus GPP, onde a DC teve uma correlação ligeiramente melhor do que o solo degradado. Nossa hipótese é que a vegetação nativa na Caatinga está passando por uma redução gradual da resiliência, mesmo com eventos de chuva, essas áreas não podem se recuperar no curto prazo, reduzindo a produtividade da vegetação e fixação de CO₂ (VENDRUSCOLO et al., 2020).

4.4.3 Análises espaço-temporais no NEB

Na América do Sul, o NEB é atualmente uma das regiões mais afetadas pela seca no país e possivelmente no futuro (MARENGO et al., 2020). Vale a pena mencionar que o período estudado abrange o recente evento de seca que ocorreu no NEB, que começou em 2012 durante um evento *La Niña* (RODRIGUES e MCPHADEN, 2014) e terminou parcialmente em 2018 (DANTAS et al., 2020).

A partir da análise temporal da ET (Fig. 17), é possível observar o efeito da seca em ET. Em 2012, que é o ano em que se iniciou uma das mais intensas secas na região (DANTAS et al., 2020), a área vermelha (baixa ET) aumentou consideravelmente, durando até 2019, período em que essas regiões foram afetadas por chuvas abaixo da média histórica. Esses valores também são vistos na Fig. 19. A Amazônia (localizada na porção oeste do Maranhão) e Mata Atlântica (litoral nordeste) apresentaram valores de ET intermediários, variando de 400 a 600 mm ano⁻¹ na maioria dos anos estudados. Também é possível observar uma variação interanual mais significativa da ET no bioma Cerrado. O uso agrícola de culturas transitórias na região, como soja, milho, arroz e outras culturas, podem explicar essas diferenças (BUAINAIM e GARCIA, 2016; JÚNIOR et al., 2019).

Os valores máximos de GPP (Fig. 18) foram localizados na região que abrange o bioma Amazônia (norte do Maranhão) e na região que abrange o bioma Mata Atlântica (sul da Bahia), que são regiões que apresentam densidades consideráveis de cobertura vegetal, com árvores atingindo até 40 m. Júnior et al. (2019) também observaram altos valores de GPP para essas regiões, com o bioma Cerrado apresentando valores de GPP mais baixos que o bioma Amazônia. O bioma Cerrado apresentou valores de GPP de maior magnitude na porção norte do estado do Maranhão. Esses valores estão de acordo com os apresentados por Wang et al.

(2021), onde foram identificados altos valores de GPP em florestas tropicais com maior temperatura média anual e precipitação, enquanto baixos valores de GPP foram observados em regiões semiáridas com limitações hídricas na região. Essa dinâmica pode ser confirmada através do mapa de PPT média anual na Fig. 16, onde altos valores de GPP são observados em áreas onde a PPT média anual é superior a 1500 mm ano⁻¹ e valores baixos de GPP em áreas com PPT média anual abaixo de 500 mm ano⁻¹. Isso esclarece que a vegetação densa da região tende a absorver uma maior proporção de carbono em biomassa.

Analisando as taxas de ET e GPP separadas por bioma nas Figuras 17 e 18, respectivamente, é possível observar uma queda acentuada nestes valores em 2012, o ano de seca intensa para toda a região (MARIANO et al., 2018; SANTOS et al., 2019). O bioma Caatinga foi o que mais sofreu, apresentando valores de ET muito baixos em relação aos anos anteriores, e é possível ver que esses valores permaneceram abaixo de 500 mm ano⁻¹ até 2017. Os demais biomas apresentaram valores mínimos de ET em 2001, exceto para o bioma Caatinga. No entanto, 2011 e 2020 tiveram a maior taxa de ET; são anos em que ocorreram chuvas significativas na região. Assim, os altos valores de ET na região estão ligados à disponibilidade hídrica.

Como mencionado anteriormente, os resultados da GPP (Fig. 20) evidenciam que a vegetação densa tem uma capacidade mais forte de transformar carbono atmosférico em biomassa, absorvendo mais CO₂ do que regiões onde a cobertura vegetal foi perturbada. Como resultado, ressaltamos a importância de preservar essas áreas. Além disso, estudos como este apoiam a adoção de medidas contra desmatamento, incentivando tanto a preservação de áreas nativas quanto a recuperação de áreas degradadas.

Nas últimas três décadas, as mudanças na cobertura do solo têm agravado o risco de desertificação em partes da Caatinga (MAPBIOMAS, 2021). No curto prazo, a capacidade das florestas tropicais para absorver carbono (líquido) é dificultada pelos impactos combinados de degradação, perturbação e desmatamento (KRUID et al., 2021). Além disso, prevê-se que as futuras alterações climáticas aumentem o potencial para a erosão do solo causada pela água em muitas áreas secas, levando o declínio do carbono orgânico do solo em algumas áreas secas e aumento do risco de desertificação (IPCC, 2021). Segundo Marengo et al. (2020), o NEB pode apresentar cenários futuros de estresse a partir de meados deste século, com baixa atividade fotossintética comparável ao solo nu. Além disso, as intensidades das secas e o aquecimento sugerem condições semidesérticas na segunda metade do século 21, com degradação ambiental que seria irreversível se o aquecimento for superior a 4 °C. Evidências empíricas sobre os

limites da adaptação em áreas de sequeiro é limitada (IPCC, 2021). Com base nisso, há uma necessidade de monitoramento mais eficaz dos fluxos de água e carbono global, com estudos indicando a dinâmica desses fluxos em áreas que apresentam diferentes tipos de cobertura do solo para quantificar o impacto real de áreas que sofreram qualquer perturbação.

4.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo, focamos na validação dos produtos MODIS ET e GPP em regiões estratégicas do bioma Caatinga, a fim de ajudar a compreender esses fluxos em diferentes densidades de cobertura vegetal (Caatinga densa e Caatinga esparsa degradada). Além disso, analisamos os padrões espaço-temporais desses fluxos em comparação com outros biomas presentes no NEB. Nossas descobertas mostram que os produtos MODIS podem prever com precisão taxas mensais e anuais de GPP e ET em escala regional para o bioma Caatinga.

Apesar das limitações das estimativas dos produtos MODIS relacionadas à parametrização da cobertura do solo, essas estimativas podem ser super ou subestimadas em alguns pontos. No entanto, elas podem representar bem a dinâmica desses fluxos para diferentes tipos de cobertura do solo e densidades de vegetação na Caatinga.

Pela primeira vez, diferenças consideráveis foram observadas no uso da água para produção e assimilação de carbono sobre áreas preservadas e degradadas da Caatinga. Além disso, mostra a importância de preservar o bioma Caatinga, dada a sua natureza de ser extremamente suscetível a disponibilidade hídrica em comparação com outros biomas do NEB, como o Cerrado, Mata Atlântica e Amazônia.

5 CAPÍTULO V – CONCLUSÕES GERAIS

Apesar das limitações das estimativas dos produtos MODIS relacionadas à parametrização da cobertura do solo, essas estimativas podem ser super ou subestimadas em alguns pontos. No entanto, elas podem representar bem a dinâmica desses fluxos para a região do Nordeste brasileiro. Esses resultados fornecem um melhor entendimento de como os diferentes tipos de degradação nesta região podem afetar as condições mais quentes e secas, permitindo identificar os impactos sobre os ciclos de água e carbono.

A análise dos fluxos de energia, água e carbono na Caatinga em diferentes estágios de degradação do solo em uma mesma região com condições atmosféricas semelhantes proporcionou um estudo mais aprofundado e único para o bioma. O desmatamento da Caatinga contribuiu para a intensificação da ET e a redução do potencial de fixação do carbono atmosférico, reduzindo a capacidade em mitigar os efeitos da crescente concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Apesar das duas áreas estudadas funcionarem como sumidouro de carbono, a área que sofreu maior perturbação na cobertura do solo, reduziu sua capacidade de absorção em 16%. Assim, áreas degradadas têm a capacidade de modificar o microclima, impactando o ambiente local e o orçamento regional de carbono.

Pela primeira vez, diferenças consideráveis foram observadas no uso da água para produção e assimilação de carbono sobre áreas preservadas e degradadas da Caatinga. Além disso, mostra a importância de preservar esse bioma, dada a sua natureza de ser extremamente suscetível a disponibilidade hídrica em comparação com outros biomas do NEB, como o Cerrado, Mata Atlântica e Amazônia.

Aqui, destacamos que análises semelhantes em períodos mais úmidos, e que avaliem de forma aprofundada a condutância estomática e a umidade do solo são necessárias, na tentativa de melhorar a precisão desses fluxos de água e carbono. Assim, também, como melhorias nos produtos MODIS ET e GPP, são incentivados estudos concentrados em reduzir as incertezas relacionadas a parâmetros biofísicos da vegetação (por exemplo, fAPAR, LAI) e dados meteorológicos que servem como informação de entrada nos algoritmos.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos da América do Sul, por ocasião dos períodos glaciais quaternários. **Paleoclimas**. 3: 1–19, 1977.
- AGUIAR, R. G.; RANDOW, C. V.; FILHO, N. P.; MANZI, A. O., AGUIAR, L. J.; CARDOSO, F. L. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p.248-257, 2006.
- AGUILAR, A. L.; HÉCTOR FLORES, I.; CRESPO, G.; MARÍN, M. I.; CAMPOS, I.; CALERA, A. 2018. Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in Northwestern Mexico. **Water** 10, 901, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10070901>.
- AHLSTROM, A.; RAUPACH, M. R.; SCHURGERS, G.; SMITH, B.; ARNETH, A.; JUNG, M. et al. The dominant role of semiarid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. **Science** 348, 895–899, 2015.
- ALBERTON, B.; TORRES, R. S.; SILVA, T. S.; DA ROCHA, H. R.; MOURA, M. S.; MORELLATO, L. P. Leafing patterns and drivers across seasonally dry tropical communities. **Remote Sens**, v. 11, p. 2267, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11192267>.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**, United Nations FAO, Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy. 1998.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce**, 2007.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, 2011.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z**, v. 8, p. 711–728, 2014. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ALVAREZ-TABOADA, F.; TAMMADGE, D.; SCHLERF, M.; SKIDMORE, A. Assessing MODIS GPP in non-forested biomes in water limited areas using EC tower data. **Remote Sens**, v. 7 (3), p. 3274–3292, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70303274>.
- ANAPPALI, S. S.; FISHER, D. K.; REDDY, K. N.; KRUTZ, J. L.; PINNAMENI, S. R.; SUI, R. Quantifying water and CO₂ fluxes and water use efficiencies across irrigated C3 and C4 crops in a humid climate. **Sci. Total Environ**, v. 663, p. 338–350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.471>.

- ANDERSON, M. C.; ALLEN, R. G.; MORSE, A.; KUSTAS, W. P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sens. Environ**, v. 122, p. 50–65, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>.
- ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; DELONG, J. P.; FOX, A. M.; BRESE, D. A.; LITVAK, M. E. Differential responses of production and respiration to temperature and moisture drive the carbon balance across a climatic gradient in New Mexico. **Global Change Biology**, 17(1), 410–424, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02269.x>.
- ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; MATSUMOTO, M.; FONSECA, C. R. Chronic anthropogenic disturbance on Caatinga dry forest fragments. **J. Appl. Ecol**, v. 57, p. 2064–2074, 2020. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.1368611/1365-2664.13686>.
- ARAÚJO, E. L.; CATRO, C. C.; ALBUQUERQUE, U. P. Dynamics of Brazilian Caatinga – A Review Concerning the Plants, Environment and People. **Functional Ecosystems and Communities**. 1, 15 – 28, 2007.
- BALDOCCHI, D.; FALGE, E.; GU, L. H. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** 82, 2415–2434, 2001.
- BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. **Glob. Chang. Biol.** 9, 479–492, 2003.
- BALDOCCHI, D. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere - the state and future of the eddy covariance method. **Glob. Chang. Biol**, v. 10(12), p. 3600–3609, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12649>.
- BALDOCCHI, D.; CHU, H.; REICHSTEIN, M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: a review. **Agric. For. Meteorol**, v. 249, p. 520–533, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.015>.
- BALDOCCHI, D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. **Glob. Chang. Biol**, v. 26, p. 242–260, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14807>.
- BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **J. Arid Environ**, v. 124, p. 377–387, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.015>.
- BARKER, J. L.; HARDEN, M. K.; ANUTA, E. A.; SMID, J. E.; HOUGHT, D. MODIS Spectral Sensivity Study: Requirements and Characterization. 84p, 1992.
- BEER, C.; CIAIS, P.; REICHSTEIN, M.; BALDOCCHI, D.; LAW, B. E.; PAPALE, D. et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. **Glob. Biogeochem. Cycles**, v. 23, p. 1–13, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008GB003233>.
- BEER, C.; REICHSTEIN, M.; TOMELLERI, E.; CIAIS, P.; JUNG, M.; CARVALHAIS, N. et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. **Science**, v. 329, p. 834–838, 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1184984>.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M.; ANGULO-MARTÍNEZ, M. A multiscalar global drought dataset: the SPEI base: a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 91 (10), p. 1351–1356, 2010. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2988.1>.

BELSHE, E.; SCHUUR, E.; BOLKER, B.; BRACHO, R. Incorporating spatial heterogeneity created by permafrost thaw into a landscape carbon estimate. **J. Geophys. Res.** 117, G01026, 2012.

BIRCH, H. F. Further aspects of humus decomposition. **Nature**, v. 182 (1172), 1958. <https://doi.org/10.1038/1821172a0>.

BOHN, V. Y.; PICCOLO, M. C. Standardized precipitation evapotranspiration index (spei) as a tool to determine the hydrological dynamic of plain regions (Argentina). **Geociências**, v. 37 (3), p. 627–637, 2018. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i3.12236>.

BORGES, C. K.; DOS SANTOS, C. A.; CARNEIRO, R. G.; SILVA, L. L.; DE OLIVEIRA, G.; MARIANO, D. 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. **Environ. Monit. Assess**, v. 192, 524, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08484-y>.

BRANDO, P. M.; SILVÉRIO, D.; MARACAHIPES-SANTOS, L.; OLIVEIRA-SANTOS, C.; LEVICK, S. R.; COE, M. T. et al. Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: implications for CO₂ and H₂O fluxes. **Glob. Chang. Biol.**, v. 25 (9), p. 2855–2868, 2019.

BRASIL - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL – MIN. **Nova delimitação da região semiárida do Brasil**. Portaria n° 89, publicada no DOU em 17 de março de 2005.

BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C. A.; COSTA, J. F.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A.; MISHRA, M. 2021. Evaluation of the TRMM product for monitoring drought over Paraíba State, northeastern Brazil: a trend analysis. **Sci. Rep.**, v. 11, 1097, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80026-5>.

BRITO, C. S.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A.; BRASIL NETO, R. M., COELHO, V. H. Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: a case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. **Atmos. Res.**, V. 250, 105380, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105380>.

BUAINAIM, A. M.; GARCIA, J. R. Crescimento da agricultura no cerrado nordestino: fatores condicionantes, limites e resultados socioeconômicos. **IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, Brasília, p. 109–139, 2016. <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9240>. Acesso em: ago. 2021.

BURBA, G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. **LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA**, p. 331, 2013.

CAMPOS, S.; MENDES, K. R.; DA SILVA, L. L.; MUTTI, P. R.; MEDEIROS, S. S.; AMORIM, L. B. et al. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Agric. For. Meteorol**, v. 271, p. 398–412, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.018>.

CASTELETTI, C. H.; SILVA, J. M.; TABERELLI, M.; SANTOS, A. M. **Quanto ainda resta da caatinga? Uma estimativa preliminar. Biodiversidade da caatinga: áreas e ações prioritárias para conservação**, 2004. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/18266/1/Caatinga.pdf>. Acesso em: mar. 2020.

CAVALCANTI, E. R.; COUTINHO, S. F. Desertification in the Northeast of Brazil: the natural resources use and the land degradation. **Soc Nat (Special Issue)** 1:891–900, 2005.

CHAPIN, F. S.; WOODWELL, G. M.; RANDERSON, J. T.; RASTETTER, E. B.; LOVETT, G. M.; BALDOCCHI, D. D. et al. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. **Ecosystems** 9, 1041–1050, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0105-7>.

CHASME, L.; BARR, A.; HOPKINSON, C.; MCCAUGHEY, H.; TREITZ, P.; BLACK, A. et al. Scaling and assessment of GPP from MODIS using a combination of airborne Lidar and Eddy covariance measurements over jack pine forests. **Remote Sens. Environ**, v. 113, p. 82–93, 2009.

CHEN, T.; VAN DER WERF, G. R.; DOLMAN, A. J.; GROENENDIJK, M. Evaluation of cropland maximum light use efficiency using eddy flux measurements in North America and Europe. **Geophys. Res. Lett.** 38, L14707, 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL047533>.

CHEN, Z.; YU, G.; GE, J.; SUN, X.; HIRANO, T.; SAIGUSA, N. et al. Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon Exchange in the Asian region. **Agric. For. Meteorol.** 182–183, 266–276, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.026>.

CHEN, X. J.; MO, X. G.; HU, S.; LIU, S. X. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China plain from 2000 to 2014. **J. Geogr. Sci**, v. 27 (6), p. 661–680, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1399-z>.

CHIEN, H.; ZHONG, Y.; YANG, K.; CHENG, H. Diurnal variability of CO₂ flux at coastal zone of Taiwan based on eddy covariance observation. **Cont. Shelf Res**, v. 162, p. 27–38, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.04.006>.

CLEVERLY, J.; EAMUS, D.; RESTREPO COUPE, N.; CHEN, C.; MAES, W.; LI, L. et al. Soil moisture controls on phenology and productivity in a semi-arid critical zone. **Sci. Total Environ.** 568, 1227–1237, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.142>.

COFFER, M. M.; HESTIR, E. L.; Variability in trends and indicators of CO₂ exchange across Arctic wetlands. **J. Geophys. Res. Biogeosci**, v. 124, p. 1248–1264, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JG004775>.

COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; AGAM, N.; SCHWARTZ, R. C.; KUSTAS, W. P.; COSH, M. H.; MCKEE, L. Soil heat flux calculation for sunlit and shaded surfaces under row crops: 2. Model test. **Agric. For. Meteorol**, v. 216, p. 129–140, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.009>.

COOPS, N. C.; FERSTER, C. J.; WARING, R. H.; NIGHTINGALE, J. Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States. **Remote Sens. Environ**, v. 113, p. 680–690, 2009.

COSTA, C. R. **Dinâmica temporal do efluxo de co2 e produção de glomalina em área de caatinga sob neossolo litólico**. Dissertação. UFPB, 2019.

CRISPIM, A. B.; MELO, C. C.; ALMEIDA, I. C.; OLIVEIRA, L. S. **Bases introdutórias sobre degradação ambiental no semiárido brasileiro**. III SERNNE, 2013.

CUNHA, A. P.; ALVALÁ, R. C.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 139 – 152, 2013.

CURTIS, P. S.; GOUGH, C. M.; Forest aging, disturbance and the carbon cycle. **New Phytologist**, 219(4), 1188–1193, 2018. <https://doi.org/10.1111/nph.15227>.

DA SILVA, P. F.; LIMA, J. R.; ANTONINO, A.C.; SOUZA, R.; DE SOUZA, E. S.; SILVA, J. R.; Alves, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **J. Arid Environ**, v. 147, p. 71–82, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>.

DANTAS, J. C.; DA SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. Drought impacts, social organization, and public policies in northeastern Brazil: a case study of the upper Paraíba River basin. **Environ. Monit. Assess.**, v. 192, p. 317, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8219-0>.

DE OLIVEIRA, G.; BRUNSEEL, N. A.; MORAES, E. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; BERTANI, G.; DOS SANTOS, T. V. et al. Evaluation of MODIS-based estimates of water-use efficiency in Amazonia. **Int. J. Remote Sens**, v. 38 (19), p. 5291–5309, 2017. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1339924>.

DE OLIVEIRA, G.; BRUNSELL, N. A.; SUTHERLIN, C. E.; CREWS, T. E.; DEHANN, L. R. Energy, water and carbon exchange over a perennial Kernza wheatgrass crop. **Agric. For. Meteorol**. 249, 120–137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.022>.

Didan, K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>

DINIZ, A. F. **Variabilidade climática e sua influência na produtividade da cultura do milho na microrregião de Feira de Santana (Bahia)**. Tese de doutorado, 2016.

ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M. P.; MATSCHULLAT, J. Vegetation greenness in northeastern Brazil and its relation to ENSO warm events. **Remote Sens**, v. 6, p. 3041–3058, 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6043041>.

FANOURLAKIS, D.; HEUVELINK, E.; CARVALHO, S. M. A comprehensive analysis of the physiological and anatomical components involved in higher water loss rates after leaf development at high humidity. **Journal Plant. Physiol.** 170, 890 – 898, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.013>.

FERREIRA, R. R.; MUTTI, P.; MENDES, K. R.; CAMPOS, S.; MARQUES, T. V.; OLIVEIRA, C. P. et al. An assessment of the MOD17A2 gross primary production product in the caatinga biome, Brazil. **Int. J. Remote Sens**, v. 42 (4), p. 1275–1291, 2021. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1826063>.

FISHER, J. B.; MELTON, F.; MIDDLETON, E.; HAIN, C.; ANDERSON, M.; ALLEN, R. et al. The future of evapotranspiration: global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resour. Res.** v. 53, p. 2618–2626, 2017. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>.

FLEICHSHER, E.; KHASHIMOV, I.; HÖLZEL, N.; KLEMM, O. Carbon exchange fluxes over peatlands on Western Siberia; Possible feedback between land-use change and climate change. **Science of the Total Environment.** v. 545, p. 424–433, 2016.

FRANK, D.; REICHSTEIN, M.; BAHN, M.; THONICKE, K.; FRANK, D.; MAHECHA, M. D.; SMITH, P.; VAN DER VELDE, M.; VICCA, S.; BABST, F. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. **Glob. Chang. Biol.** 21, 2861–2880, 2015. <https://doi.org/10.1111/gcb.12916>.

FREITAS, P. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 104–111, 2006.

FRIEDLINGSTEIN, P.; O’SULLIVAN, M.; JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; HAUCK, J.; OLSEN, A. et al. Global carbon budget 2020. **Earth Syst. Sci. Data**, v.12, p. 3269–3340, 2020. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.

FRIEND, A. D.; ARNETH, A.; KIANG, N. Y.; LOMAS, M.; OGEE, J.; RODENBECK, C.; RUNNING, S. W.; SANTAREN, J. D.; SITCH, S.; VIOVY, N. et al. FLUXNET and modelling the global carbon cycle. **Glob. Chang. Biol.** 13, 610–633, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01223.x.2007>.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIM, J.; SHUKLA, S. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. **Sci. Data**, v. 2, 150066, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.

GALVÍNCIO, J. D.; NAUE, C. R.; ANGELOTTI, F.; MOURA, M. S. Vitis vinifera spectral response to the increase of CO₂. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Recife, v. 1, p. 1–18, 2011.

GAMON, J. A.; HUENNRICH, K. F.; STONE, R. S.; TWEEDIE, C. E. Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt. **Remote Sens. Environ.** 129, 144–153, 2013.

- GAO, G.; XU, C. Y.; CHEN, D.; SINGH, V. P. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China. **Stoch Env Res Risk A** 26:655–669, 2012.
- GEBREMICHAEL, M.; BARROS, A. P. Evaluation of MODIS gross primary productivity (GPP) in tropical monsoon regions. **Remote Sens. Environ**, v. 100, p. 150–166, 2006.
- GIONGO, V.; GALVÃO, S. R.; MENDES, A. M.; GAVA, C. A.; CUNHA, T. J. Soil Organic in the Brazilian Semi-arid Tropics. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**. 5, 12-20, 2011.
- GITELSON, A. A.; PENG, Y.; ARKEBAUER, T. J.; SCHEPERS, J. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: implications for remote sensing of primary production. **Remote Sens. Environ**, v. 144, p. 65-72, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.004>.
- GOLDBLATT, R.; BALLESTEROS, A. R.; BURNEY, J. High Spatial Resolution Visual Band Imagery Outperforms Medium Resolution Spectral Imagery for Ecosystem Assessment in the Semi-Arid Brazilian Sertão. **Remote Sensing**. 9, 1336, 2017. doi:10.3390/rs9121336.
- GOULDEN, M. L.; WINSTON, G. C.; MCMILLAN, A. M. S.; LITVAK, M. E.; READ, E. L.; ROCHA, A. V.; ROB ELLIOT, J. An eddy covariance mesonet to measure the effect of forest age on land–atmosphere exchange. **Global Change Biology**, 12(11), 2146–2162, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01251.x>.
- GOUGH, C. M.; CURTIS, P. S.; HARDIMAN, B. S.; SCHEUERMANN, C. M.; BOND-LAMBERTY, B. Disturbance, complexity, and succession of net ecosystem production in North America's temperate deciduous forests. **Ecosphere**, 7(6), e01375, 2016. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1375>.
- GRAF, A. et al. Altered energy partitioning across terrestrial ecosystems in the European drought year 2018. **Philos. Trans. R. Soc. B**, v. 375, 20190524, 2020. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0524>.
- GUSMÃO, L. F.; QUEIROZ, L.; BRAVO, F.; JUNCÁ, F. A.; OLIVEIRA, R. P.; BASEIA, I. G. **CAATINGA: Diversidade na adversidade do semiárido brasileiro**. MCTIC, 2016.
- HAVERD, V.; AHLSTROM, A.; SMITH, B.; CANADELL, J. G. Carbon cycle responses of semiarid ecosystems to positive asymmetry in rainfall. *Glob. Chang. Biol.* 23, 793–800, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcb.13412>, 2017.
- HATFIEL, J. L.; DOLD, C. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. **Front. Plant Sci**, v. 10, 103, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>.
- HE, F. **Statistical Modeling of CO2 Flux Data**. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 5719, 2018. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/5719>.
- HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S.W.; KIMBALL, J. S.; NEMAN, R. R.; DAVIS, K. J. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 1908–1924, 2006. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.853936>.

HEMES, K. S.; CHAMBERLAIN, S. D.; EICHELHANN, E.; ANTHONY, T.; VALACH, A.; KASAK, K.; BALDOCCHI, D. D. et al. Assessing the carbon and climate benefit of restoring degraded agricultural peat soils to managed wetlands. **Agricultural and Forest Meteorology**, 268, 202–214, 2019. https://doi.org/10.1016/j.agrfo_rmet.2019.01.017.

HUANG, X.; XIAO, J.; MA, M. Evaluating the performance of satellite-derived vegetation indices for estimating gross primary productivity using FLUXNET observations across the globe. **Remote Sens**, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11151823>.

HUANG, X.; XIAO, J.; WANG, X.; MA, M. Improving the global MODIS GPP model by optimizing parameters with FLUXNET data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 300, 108314, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108314>

HUXMAN, T. E.; SNYDER, K. A.; TISSUE, D.; LEFFLER, A. J.; OGLE, K.; POCKMAN, W. T. et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. **Oecologia**, v. 141 (2), p. 254–268, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1682-4>.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15833-uso-da-terra.html?=&t=downloads>. Acesso em: nov. 2020.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15833-usoda-terra.html?=&t=downloads>. Acesso em: jul. 2021.

INMET - **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: nov. 2020.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems**, 2019.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. Acesso em: dez. 2021.

ITO, A.; INATOMI, M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. **J. Hydrometeorol**, v. 13, p. 681–694, 2012. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05034.1>.

JARVIS, P.; REY, A.; PETSİKOS, C.; WINGATE, L.; RAYMENT, M.; PEREIRA, J. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: the “Birch effect”. **Tree Physiol**. 27, 929–940, 2007. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.929>.

JUNG, M.; REICHSTEIN, M.; MARGOLIS, H. A.; CESCATTI, A.; RICHARDSON, A. D.; ARAIN, M. A. et al. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat,

and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 116, G00J07, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JG001566>.

JUNIOR, C. A.; COSTA, G. M.; ROSSI, F. S.; VALE, J. C.; LIMA, R. B.; LIMA, M. et al. Remote sensing for updating the boundaries between the Brazilian Cerrado-Amazonia biomes. *Environ. Sci. Policy*, v. 101, p. 383–392, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.006>.

KANG, X.; YAN, L.; ZHANG, X.; LI, Y.; TIAN, D.; PENG, C. et al. Modeling gross primary production of a typical coastal wetland in China using MODIS time series and CO₂ eddy flux tower data. *Remote Sens*, v. 10 (5), p. 708, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10050708>.

KNOWLAND, K. E.; KELLER, C.; WARGAN, K.; WEIR, B.; WALES, P.; OTT, L. Previsões da qualidade do ar quase em tempo real usando o NASA GEOS modelo, *EGU General Assembly*, EGU21-13587, 2021. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13587>.

KNOX, S. H.; DRONOVA, I.; STURTEVANT, C. Using digital camera and Landsat imagery with eddy covariance data to model gross primary production in restored wetlands. *Agric. For. Meteorol.* 237, 233–245, 2017.

KOCH, R.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KLEINSCHMIT, B. Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: combination of modelled plant diversity hot spots and threat patterns. *J. Nat. Conserv.*, v. 35, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.11.004>.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: Sanquetta, C.R., Watzlawick, L.F., Balbinot, R., (Ed.). *As florestas e o carbono*. Curitiba: FUPPEF/Imprensa da UFPR, p. 251-264, 2002.

KOHONEN, K.M.; DEWAR, R.; TRAMONTANA, G.; MAURANEN, A.; KOLARI, P. Intercomparison of methods to estimate GPP based on CO₂ and COS flux measurements. *Biogeosciences*, 2022. <https://doi.org/10.5194/bg-2022-32>.

KOSTER, R. D.; DIRMEYER, P. A.; GUO, Z.; BONAN, G.; CHAN, E.; COX, P. et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science* 305, 1138–1140, 2004.

KRAMER, P. J.; KOZLOWSKI, T. T. *Physiology of woody plants*. Academic Press, 1979.

KRUID, S.; MACEDO, M. N.; GORELLK, S. R.; WALKER, W.; MOUTINHO, P.; BRANDO, P. M. et al. Beyond deforestation: carbon emissions from land grabbing and forest degradation in the Brazilian Amazon. *Front. For. Glob. Chang*, 2021. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.645282>.

LAIPELT, L.; KAYSER, R. H.; FLEISCHMANN, A. S.; RUHOFF, A.; BASTIAANSEN, W.; ERICKSON. et al. ISPRS J. Photogramm. *Remote Sens*, 2021. 178. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>.

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO J. O. A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. **Espaço e Geografia**. v. 6, n.1, ISSN: 1516-9375. São José dos Campos, 2003.

LAW, B. E.; SUN, O. J.; CAMPBELL, J.; TUYL, S. V.; THORNTON, P. E. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. **Global Change Biology**, 9, 510–524, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00624.x>.

LE HOUÉROU, H.N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review. **Arid Soil Res. Rehabil**, v. 14 (1), p. 3–14, 2000. <https://doi.org/10.1080/089030600263139>.

LEAL, I. R.; SILVA, J. M.; TABARELLI, M.; LACHER JR, T. E. Changing the course of biodiversity conservation in the caatinga of northeastern Brazil. **Conserv. Biol.** 19, 701e706, 2005. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00703.x>.

LEAL, L. C.; ANDERSEN, A. N.; LEAL, I. R. Disturbance winners or losers? Plants bearing extrafloral nectaries in Brazilian Caatinga. **Biotropica** 47: 468–474, 2015.

LEUNING, R.; ZHANG, Y. Q.; RAJAUD, A.; CLEUGH, H.; TU, K. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. **Water Resour Res** 44(10):652–655, 2008.

LI, Z. Q.; YU, G. R.; XIAO, X. M.; LI, Y. N.; ZHAO, X. Q.; REN, C. Y.; ZHANG, L. M.; FU, Y. L. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data. **Remote Sens. Environ.** 107, 510–519, 2007.

LI, X.; XIAO, J.; HE, B. Higher absorbed solar radiation partly offset the negative effects of water stress on the photosynthesis of Amazon forests during the 2015 drought. **Environ. Res. Lett**, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab0b1>.

LI, Y.; LI, L.; DONG, J.; BAI, J. Assessing MODIS carbon and water fluxes in grasslands and shrublands in semiarid regions using eddy covariance tower data. **Int. J. Remote Sens.**, v. 42 (2), p. 595–616, 2021. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1811915>.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R.W. Remote Sensing and Image Interpretation. Toronto: 3 ed., **John Wiley and Sons.**, 1994.

LIN, Y.-S. et al. Optimal stomatal behaviour around the world. **Nat. Clim. Change**. 5, 459 – 464, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2550>.

LIU, Z.; SHAO, Q.; LIU, J. The performances of MODIS-GPP and-Et products in China and their sensitivity to input data (FPAR/LAI). **Remote Sens.**, v. 7 (1), p. 135–152, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs7010135>.

LIU, Y.; MO, X.; HU, S.; CHEN, X.; LIU, S. Attribution analyses of evapotranspiration and gross primary productivity changes in Ziya-Daqing basins, China during 2001–2015. **Theoretical and Applied Climatology**. 139, 1175 – 1189, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03004-6>.

LOIK, M. E.; BRESHEARS, D. D.; LAUENROTH, W. K.; BELNAP, J. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA. **Oecologia** 141, 269–281, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1570-y>.

LU, X.; ZHUANG, Q. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. **Remote Sens. Environ.**, v. 114, p. 1924–1939, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.001>.

LUO, Y.; KEENAN, T.; SMITH, M. Predictability of the terrestrial carbon cycle. **Glob. Chang. Biol.**, v. 21, p. 1737–1751, 2015. <https://doi.org/10.1111/gcb.12766>.

MA, S.; BALDOCCHI, D. D.; HATALA, J. A.; DETTO, M.; CURIEL, Y. J. Are rain-induced ecosystem respiration pulses enhanced by legacies of antecedent photodegradation in semi-arid environments? **Agric. For. Meteorol.**, v. 154–155, p. 203–213, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.11.007>.

MA, J. et al. Spatial-temporal consistency between gross primary productivity and solar-induced chlorophyll fluorescence of vegetation in China during 2007-2014. **Sci Total Environ** 639:1241–1253, 2018.

MAHECHA, M. D., REICHSTEIN, M., JUNG, M., SENEVIRATNE, S.I., ZAEHLE, S., BEER, C., BRAAKHEKKE, M.C., CARVALHAIS, N., LANGE, H., LE MAIRE, G., MOORS, E., 2010. Comparing observations and process-based simulations of biosphere-atmosphere exchanges on multiple timescales. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 115, 1–21. <https://doi.org/10.1029/2009JG001016>.

MAINGUET, M.; SILVA G. G. Desertification and drylands development: what can be done? **Land Degrad Dev** 9:375–382, 1998.

MAPBIOMAS. **Desmatamento, queimadas e retração da superfície da água aumentam o risco de desertificação da Caatinga**. 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/> Acesso em: out. 2021.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: Present state and future projections. **Climatic Change**, 129, 103–115, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Ann. Braz. Acad. Sci.**, 2017a. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast-Brazil - past, present, and future. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 129, p. 1189–1200, 2017b. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; NOBRE, C. A.; NETO, G. G.; MAGALHAES, A. R.; TORRES, R. R. et al. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Nat. Hazards**, v. 103, p. 2589–2611, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>.

MARIANO, D. A.; DOS SANTOS, C. A.; WARDLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYER, A. V.; TADESSE, T. et al. 2018. Use of remote sensing indicators to assess the effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sens. Environ.**, v. 213, p. 129–143, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>.

MARQUES, T. V.; MENDES, K.; MUTTI, P.; MEDEIROS, S.; SILVA, L.; PEREZ-MARIN, A. M. et al. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. **Agric. For. Meteorol.**, v. 287, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>.

MATIN, M. A.; BOURQUE, C. P. Assessing spatiotemporal variation in actual evapotranspiration for semi-arid watersheds in northwest China: evaluation of two complementary-based methods. **J Hydrol** 486:455–465, 2013.

MCNICOL, I. M.; RYAN, C. M.; MITCHARD, E. T. Carbon losses from deforestation and widespread degradation offset by extensive growth in African woodlands. **Nat. Commun.**, v. 9 (1), p. 1–11, 2018.

MEDEIROS, S.; CAVALCANTE, A. M. B.; MARIN, A. M.; TINÔCO, L. B.; SALCEDO, I. H.; PINTO, T. F. **Synopsis of the demographic census for the Brazilian semi-arid region. Campina Grande: National Semi-Arid Institute, 2012.**

MEKONNEN, Z. A.; GRANT, R. F.; SCHWALM, C. Contrasting changes in gross primary productivity of different regions of North America as affected by warming in recent decades. **Agric For Meteorol** 218:50–64, 2016.

MENDES, K. R.; CAMPOS, S.; DA SILVA, L. L.; MUTTI, P. R.; FERREIRA, R. R.; MEDEIROS, S. S. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Sci, Rep.**, v. 10, 9454, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>.

MENDES, K. R.; CAMPOS, S.; MUTTI, P. R.; FERREIRA, R. R.; RAMOS, T. M.; MARQUES, T. V. Assessment of SITE for CO₂ and energy fluxes simulations in a seasonally dry tropical Forest (Caatinga Ecosystem). **Forests**, v. 12, 86, 2021, <https://doi.org/10.3390/f12010086>.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília: UNB, 2012.

MENEZES, J. A.; SANTOS, T. E.; MONTENEGRO, A. A.; SILVA, J. R. Comportamento temporal da umidade do solo sob Caatinga e solo descoberto na Bacia Experimental do Jatobá, Pernambuco. **Water Resour. Irrig. Manag.**, v. 2, p. 45–51, 2013.

MERONI, M.; FASBENDER, D.; LOPEZ-LOZANO, R.; MIGLIAVACCA, M. Assimilation of earth observation data over cropland and grassland sites into a simple GPP model. **Remote Sens** 11, 1–21, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11070749>.

MIAO, H.; CHEN, S.; CHEN, J.; ZHANG, W.; ZHANG, P.; WEI, L. Cultivation and grazing altered evapotranspiration and dynamics in Inner Mongolia steppes. **Agric. For. Meteorol.**, v. 149 (11), p. 1810–1819, 2009.

MMA. 2015. **Caatinga**. <http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>. Acesso em: fev. 2020.

MO, X.; LIU, S.; MENG, D.; LIN, Z. Exploring the interannual and spatial variations of ET and GPP with climate by a physical model and remote sensing data in a large basin of Northeast China. **Int J Climatol** 34:1945–1963, 2014.

MORAIS, Y. C.; ARAÚJO, M. S.; MOURA, M. S.; GALVÍNIO, J. D.; MIRANDA, R. Q. Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 32 (4), p. 585–599, 2017. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324007>.

MORO, M. F.; LUGHADHA, E. N.; FILER, D. L.; DE ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A catalogue of the vascular plants of the Caatinga Phytogeographical Domain: a synthesis of floristic and phytosociological surveys. **Phytotaxa** 160, 1e118, 2014. <http://dx.doi.org/10.11646/phytotaxa.160.1.1>.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **J. Atmos. Sci.** 38: 2653–2675, 1981.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sens. Environ.**, v. 115 (8), p. 1781–1800, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>.

MUTTI, P. R.; SILVA, L. L.; MEDEIROS, S. S.; DUBREUIL, V.; MENDES, K. R.; MARQUES, T. V. et al. Basin scale rainfall-evapotranspiration dynamics in a tropical semiarid environment during dry and wet years. **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**, v. 75, p. 29-43, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.007>.

NASA, 2020. <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.

ODUM, E. P. Strategy of ecosystem development. **Science**, 164(3877), 262–270, 1969. <https://doi.org/10.1126/science.164.3877.262>.

OLIVEIRA, A. F.; SOUSA, L. I.; COSTA, V. A.; ANDRADE, J. V.; LIMA, L. A.; SALES, P. A. Long-term effects of grazing on the biological, chemical, and physical soil properties of the Caatinga biome. **Microbiol. Res.**, v. 253, p. 126893, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126893>.

OLIVEIRA, L. M. **Estimativa da evapotranspiração utilizando sebal automatizado em clima mediterrânico**. Dissertação de mestrado. UFCG, 2018.

OLIVEIRA, M. L.; DOS SANTOS, C. A.; DE OLIVEIRA, G.; PEREZ-MARIN, A. M.; SANTOS, C. A. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. **Sci. Total Environ.**, v. 792, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. Climatic consequences of a large-scale desertification in northeast Brazil: a GCM simulation study. **J. Clim.**, v. 17 (16), p. 3203–3213, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2).

PARKINSON, C. L, WARD, A; KING, M. D. Earth Science Reference Handbook, a Guide to NASA's Earth Science Program and Earth Observing Satellite Missions, Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2006.

PEI, Y.; DONG, J.; ZHANG, Y.; YANG, J.; ZHANG, Y.; JIANG, C. Performance of four state-of-the-art GPP products (VPM, MOD17, BESS and PML) for grasslands in drought years. **Ecol. Inform.**, v. 56, 101052, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101052>.
PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2002.

PEREIRA, M. P.; JUSTINO, F.; MALHADO, A. C.; BARBOSA, H.; MARENGO, J. The influence of oceanic basins on drought and ecosystem dynamics in Northeast Brazil. **Environ. Res. Lett.** 9: 124013, 2014.

PEREZ-MARIN, A. M.; MENEZES, R. S.; SILVA, E. D.; SAMPAIO, E. V. Effects of *Gliricidia sepium* on soil nutrients, microclimate and maize yield in an agroforestry system in semi-arid Paraíba, Brazil. **Ver. Bras. Ciênc. Solo**. v. 30, p. 555–564, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300015>.

PIAO, S. L.; YIN, G. D.; TAN, J. G.; CHENG, L.; HUANG, M. T.; LI, Y. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. **Glob. Change Biol.**, v. 21 (4), p. 1601–1609, 2015. <https://doi.org/10.1111/gcb.12795>.

PLAZA, C.; ZACCONE, C.; SAWICKA, K.; MÉNDEZ, A, M.; TARQUIS, A.; GASCÓ, G. et al. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. **Sci. Rep.**, v. 8, 13788, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32229-0>.

PRADO, D. E. As Caatingas da America do Sul. In I. R. Leal, M. Tabarelli, and J. M. C. Da Silva (Eds.). **Ecologia e conservação da Caatinga**, pp. 3–73. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil, 2003.

PRUIT, W. O. Behavior of the barren-ground caribou. **Biological papers of the university of Alaska**, n. 3, 1960. <http://hdl.handle.net/11122/1425>.

QIU, R.; HAN, G.; MA, X.; HAO, X.; SHI, T.; ZHANG, M. A comparison of OCO-2 SIF, MODIS GPP, and GOSIF data from gross primary production (GPP) estimation and seasonal cycles in North America. **Remote Sens.**, v. 12, 258, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12020258>.

QUERINO, C. A.; MOURA, M. A.; QUERINO, J. K.; RADOW, C. V.; FILHO, A. O. Study of the global solar radiation and the internal and external transmissivity index in amangrove forest in Alagoas – Brazil. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 26 (2), 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200005>.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019.

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D. A.; PRENTISS, D. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, vol. 106, no. D24, pages 33,579–33,591, 2001.

RAHMAN, M. M.; ROBSON, A. Integrating landsat-8 and sentinel-2 time series data for yield prediction of sugarcane crops at the block level. **Rem. Sens.**, v. 33, p. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12081313>.

RAMOELO, A.; MAJOZI, N.; MATHIEU, R.; JOVANOVIĆ, N.; NICKLESS, A.; DZIKITI, S. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African Savanna, South Africa. **Remote Sens.** 6, 7406–7423, 2014.

REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; PAPALE, D.; AUBINET, M.; BERBIGIER, P. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Glob. Change Biol.**, v. 11 (9), p. 1424–1439, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>.

REICHSTEIN, M.; PAPALE, D.; VALENTINI, R.; AUBINET, M.; BERNHOFER, C.; KNOHL, A. et al. Determinants of terrestrial ecosystem carbon balance inferred from European eddy covariance flux sites. **Geophysical Research Letters**, 34(1), 2007. <https://doi.org/10.1029/2006GL027880>

REICHSTEIN, M.; BAHN, M.; CIAIS, P.; FRANK, D.; MAHECHA, M. D.; SENEVIRATNE, S. I. et al. Climate extremes and the carbon cycle. **Nature** 500, 287–295, 2013. <https://doi.org/10.1038/nature12350>.

REICHSTEIN, M.; BAHN, M.; MAHECHA, M. D.; KATTGE, J.; BALDOCCHI, D. D. Linking plant and ecosystem functional biogeography. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 111, 13697–13702, 2014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216065111>.

RICHARDSON, A. D.; KEENAN, T. F.; MIGLIAVACCA, M.; RYU, Y.; SONNENTAG, O.; TOOMEY, M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. **Agric. For. Meteorol.** 169, 156–173, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>.

RIEBEEK, H.; SIMMON, R. **The carbon cycle**. NASA – earth observatory, 2011. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>.

ROCHA, L. S. **Modelagem para determinação do fluxo de co2 em paisagens naturais e antrópicas na região amazônica a partir de dados do sensor modis**. Dissertação de mestrado, 2018.

RODRIGUES, A., PITA, G., MATEUS, J., KURZ-BESSON, C., CASQUILHO, M., CERASOLI, S. et al. Eight years of continuous carbon fluxes measurements in a Portuguese

eucalypt stand under two main events: drought and felling. **Agric. For. Meteorol.**, v. 151 (4), p. 493–507, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.12.007>.

RODRIGUES, R. R.; MCPHADEN, M. J. Why did the 2011–2012 La Nina cause a severe drought in the Brazilian Northeast? **Geophys. Res. Lett.**, v. 41, p. 1012–1018, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013GL058703>.

ROTENBERG, E.; YAKIR, D. Contribution of semi-arid forests to the climate system, **Science**. v. 327, p. 451–454, 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1179998>.

ROUCOU, P.; DE ARAGAO, R.; ORIBE, J.; HARZALLAH, A.; FONTAINE, B.; JANICOT, S. Vertical motion changes related to northeast Brazil rainfall variability: a GCM simulation. **Int. J. Climatol**. 16: 879–891, 1996.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. RStudio, Inc., Boston, MA, 2019.

RUHOFF, A. L. **Remote Sensing Applied to Estimation of Evapotranspiration in Tropical Biomes**. Federal University of Rio Grande do Sul PhD diss, 2011.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; ARAGAO, L. E.; MU, Q.; MALHI, Y.; COLLISCHONN, W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using Eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande Basin. **Hydrol. Sci. J.**, v. 58 (8), p. 1658–1676, 2013. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.837578>.

RUNNING, S. W.; BALDOCCHI, D. D.; TURNER, D. P.; GOWER, S. T.; BAKWIN, P. S.; HIBBARD, K. A. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling. Ecosystem Modeling and EOS Satellite Data. **Global Terrestrial Monitoring Network**, v. 70, p. 108-127, 1999.

RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. **BioScience**, 54: 547– 560, 2004. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:ACSMOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2).

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2H.006>

RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. **NASA EOSDIS Land Processes DAAC**, 2017. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>

SAGAR, R.; LI, G. Y.; SINGH, J. S.; WAN, S. Carbon fluxes and species diversity in grazed and fenced typical steppe grassland of Inner Mongolia, China. **J. Plant Ecol.**, v. 12 (1), p. 10–22, 2019.

SAMPAIO, E. V.; COSTA, T. L. Estoques e fluxos de carbono no semiárido nordestino: Estimativas Preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 12, 75-1291, 2011.

SANTOS, T. V. **Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do jacuí por meio de imagens orbitais**. Dissertação de Mestrado, Universidade federal do rio grande do sul, 2009.

SANTOS, C. A.; BRASIL NETO, R. M.; DA SILVA, R. M, et al. Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. **Stoch, Environ, Res, Risk Assess.**, v. 33, p. 545–562, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1619-9>.

SANTOS, C. A.; DO NASCIMENTO, T. V.; DA SILVA, R. M. Analysis of forest cover changes and trends in the Brazilian semiarid region between 2000 and 2018. **Environ. Earth Sci.**, v. 79, 418, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09158-1>.

SANTOS, J. C.; LEAL, I. R.; CORTEZ-ALMEIDA, J. S.; FERNANDES, G. W.; TABARELLI, M. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Trop. Conserv. Sci**, v. 4 (3), p. 276–286, 2011, <https://doi.org/10.1177/194008291100400306>.

SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, M. T.; FIGUEIREDO, K. V.; FALCÃO, H. M.; ARRUDA, E. C.; ALMEIDA-CORTEZ, J. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theor. Exp. Plant Physiol.**, v. 26, p. 83–99, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>.

SAUSEN, T. M. **Sensoriamento remoto e suas aplicações para recursos naturais**. INPE. Disponível em: <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm#top>. Acesso em: nov. 2020.

SCHIMMEL, D. S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Glob. Chang. Biol.**, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00008.x>.

SCHLESINGER, W. H. An evaluation of abiotic carbon sinks in deserts. **Glob. Chang. Biol.** 23, 25–27, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcb.13336>.

SCHWALM, C. R.; WILLIAMS, C. A.; SCHAEFER, K.; ANDERSON, R.; ARAIN, M.A.; BAKER, I.; BARR, A.; BLACK, T. A.; CHEN, G.; CHEN, J. M. et al. A model-data intercomparison of CO₂ exchange across North America: Results from the North American Carbon Program site synthesis. **J. Geophys. Res.** 115, G00H05, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JG001229>.

SCOTT, R.L.; HUXMAN, T. E.; CABLE, W. L.; EMMERICH, W. E. Partitioning of evapotranspiration and its relation to carbon dioxide exchange in a Chihuahuan Desert shrubland. **Hydrological Processes** 20 (15): 3227–3243, 2006.

SEDDON, A. W.; MACIAS-FAURIA, M.; LONG, P. R.; BENZ, D.; WILLIS, K. J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature* 531: 229–232, 2016.

SEEG, **Sistema de Estimativa de Emissão de gases**. 2022. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: nov. 2022.

SHUKLA, J.; MINTZ, Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate. *Science* 215:1498–1501, 1982.

SILVA, C. A. **Carbono na parte aérea de plantios de Eucalyptus spp. – em nível de árvore para amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR.** Piracicaba. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2013.

SILVA, J. M.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**, Springer, 2017.

SILVA, P. F.; LIMA, J. R.; ANTONINO, A. C.; SOUZA, R.; SOUZA, E. D.; SILVA, J. R. et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *J. Arid Environ.*, v. 147, p. 71–82, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>.

SILVEIRA, H. L.; GALVÃO, L. S.; SANCHES, I. D.; SÁ, I. B.; TAURA, T. A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying the relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 73, p. 179-190, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.016>.

SMALLMAN, T. L.; MILODOWSKI, D. T.; NETO, E. S.; KOREN, G.; OMETTO, J.; WILLIAMS, M. Parameter uncertainty dominates C-cycle forecast errors over most of Brazil for the 21st century. *Earth Syst, Dyn.*, v. 12, p. 1191–1237, 2021. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1191-2021>.

SMITH, W. K., REED, S. C., CLEVELAND, C. C., BALLANTYNE, A. P., ANDEREGG, W. R. WIEDER, W. R. et al. Large divergence of satellite and earth system model estimates of global terrestrial CO₂ fertilization. *Nat. Clim. Chang.*, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate2879>.

SONG, C.; SUN, L.; HUANG, Y. Carbon exchange in a freshwater marsh in the Sanjiang Plain, Northeastern China. *Agric. For. Meteorol.* 151, 1131–1138, 2011.

SONG, L.; ZHUANG, Q.; YIN, Y.; ZHU, X.; WU, S. Spatio-temporal dynamics of evapotranspiration on the Tibetan Plateau from 2000 to 2010. *Environ Res Lett* 12(1):014011, 2017.

SPIELAGEN, R. F. Hotspots in the Arctic: Natural archives as an early warning system for global warming. *Geology*, Boulder, v. 40, n. 11, p. 1055-1056, 2012.

STOCKLI, R.; LAWRENCE, D. M.; NIU, G. Y.; OLESON, K. W.; THORNTON, P. E.; YANG, Z. L.; BONAN, G. B.; DENNING, A. S.; RUNNING, S. W. Use of FLUXNET in the community land model development. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JG0000562>.

STRASSBURG, B. B.; IRIBARREM, A.; BEYER, H. L. et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, v. 586, p. 724–729, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>.

SUN, C.; REN, L. Assessment of surface water resources and evapotranspiration in the Haihe River basin of China using SWAT model. **Hydrol Process** 27:1200–1222, 2013.

TARIN, T.; NOLAN, H. R.; MEDLYN, B. E.; CLEVERLY, J.; EAMUS, D. Water-use efficiency in a semi-arid woodland with high rainfall variability. **Glob. Chang. Biol.**, v. 26, p. 498–508, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14866>.

TARIN, T.; NOLAN, R. H.; EAMUS, D.; CLEVERLY, J. Carbon and water fluxes in two adjacent Australian semi-arid ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**. 281, 107853, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107853>.

TERRA. The EOS Flagship. Disponível em: <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis>. Acesso em: out. 2020.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration. Washington, D.C.: **Transactions of the American Geophysical Union**, 1944.

TUCCI, C. E. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre, RG: UFRGS, 2001.

VENDRUSCOLO, J.; PEREZ-MARIN, A. M.; FELIX, E. S.; FERREIRA, K. R.; CAVALHEIRO, W. C.; FERNANDES, I. M. Monitoring desertification in semiarid Brazil: using the Desertification Degree Index (DDI). **Land Degrad. Dev.**, p. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3740>.

VERMA, M.; FRIEDL, M. A.; RICHARDSON, A. D.; KIELY, G.; CESCATTI, A.; LAW, B. E.; WOHLFAHRT, G.; GIELEN, B.; ROUPSARD, O.; MOORS, E. J. et al. Remote sensing of annual terrestrial gross primary productivity from MODIS: An assessment using the FLUXNET La Thuile data set. **Biogeosciences** 11, 2185–2200, 2014. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2185-2014>.

VERNADSKY, V. *Biosfera*. New York, NY: Springer-Verlag, 1998.

VIEIRA, R. M.; TOMASELLA, J., BARBOSA, A. A.; MARTINS, M. A.; RODRIGUEZ, D. A.; REZENDE, F. S. Desertification risk assessment in Northeast Brazil: current trends and future scenarios. **Land Degrad. Dev.**, v. 32, p. 224–240, 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3681>.

VAN DIJK, A.; DOLMAN, A. J.; SCHULZE, E. D. Radiation, temperature, and leaf area explain ecosystem carbon fluxes in boreal and temperate European forests. **Global Biogeochemical Cycles**, 19(2), 2005. <https://doi.org/10.1029/2004G B002417>.

WANG, Y. F.; CUI, X. Y.; HAO, Y. B.; MEI, X. R.; YU, G. Y.; HUANG, X. Z.; KANG, X. M.; ZHOU, X. Q. The fluxes of CO₂ from grazed and fenced temperate steppe during two drought years on the Inner Mongolia Plateau, China. **Sci. Total Environ.** 410, 182–190, 2011.

WANG, S.; ZHANG, Y.; JU, W.; QIU, B.; ZHANG, Z. Tracking the seasonal and inter-annual variations of global gross primary production during last four decades using satellite nearinfrared reflectance data. **Sci. Total Environ.**, v. 755, 142569, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142569>.

WANG, X.; MA, M.; LI, X.; SONG, Y.; TAN, J.; HUANG, G. et al. Validation of MODIS-GPP product at 10 flux sites in northern China. **Int. J. Remote Sens.**, v. 34 (2), p. 587–599, 2013. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.715774>.

WEHR, R.; COMMANE, R.; MUNGER, J. W.; MCMANUS, J. B.; NELSON, D. D.; ZAHNISER, M. S.; SALESKA, S. R.; WOFSY, S. C. Dynamics of canopy stomatal conductance, transpiration, and evaporation in a temperate deciduous forest, validated by carbonyl sulfide uptake. **Biogeosciences** 14 (2), 389 – 401, 2017. <https://doi.org/10.5194/bg-14-389-2017>.

WU, C.; CHEN, J.; HUANG, N. Predicting gross primary production from the enhanced vegetation index and photosynthetically active radiation: evaluation and calibration. **Remote Sens. Environ.**, v. 115 (12), p. 3424–3435, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.006>.

XIAO, J.; SUN, G.; CHEN, J.; CHEN, H.; CHEN, S.; DONG, G.; GAO, S. “Carbon Fluxes, Evapotranspiration, and Water Use Efficiency of Terrestrial Ecosystems in China.” **Agricultural and Forest Meteorology** 182: 76–90, 2013. doi:10.1016/j.agrformet.2013.08.007.

XIAO, J. F.; DAVIS, K. J.; URBAN, N. M.; KELLER, K. Uncertainty in model parameters and regional carbon fluxes: a model-data fusion approach. **Agric. For. Meteorol.** 189-190, 175–186, 2014.

XIE, S.; MO, X.; HU, S.; LIU, S. Contributions of climate change, elevated atmospheric CO₂ and human activities to ET and GPP trends in the Three-North Region of China. **Agric. For. Meteorol.**, v. 295, 108183, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108183>.

XIN, F.; XIAO, X.; ZHAO, B.; MIYATA, A.; BALDOCCHI, D.; KNOX, S. et al. Modeling gross primary production of paddy rice cropland through analyses of data from CO₂ Eddy flux tower sites and MODIS images. **Remote Sens. Environ.**, v. 190, p. 42–55, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.025>.

XING, W. et al. Changes of reference evapotranspiration in the Haihe River Basin: present observations and future projection from climatic variables through multi-model ensemble. **Glob Planet Chang** 115:1–15, 2014.

XU, L.; BALDOCCHI, D. D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California, **Agric. For. Meteorol.**, 123, 79–96, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.10.004>,

YANG, F. H.; LCHII, K.; WHITE, M. A.; HASHIMOTO, H.; MICHAELIS, A. R.; VOTAVA, P. et al. Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AMERiFLUX data through support vector machine approach. **Remote Sens. Environ.**, v. 110, p. 109–122, 2007.

YANG, P. et al. Estimation of water consumption for ecosystems based on vegetation interfaces processes model: a case study of the Aksu River Basin, Northwest China. **Sci Total Environ** 613: 186–195, 2018.

YANG, Z.; ZHANG, Q.; HAO, X.; YUE, P. Changes in evapotranspiration over global semiarid regions 1984–2013. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 124 (6), p. 2946–2963, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029533>,

YAO, Y. et al. Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years. **Glob Chang Biol** 24:184–196, 2018.

YAO, J.; LIU, H.; HUANG, J. et al. Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production. **Nat. Commun.**, v. 11, 1665, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15515-2>.

YOU, N.; MENG, J.; ZHU, L.; JIANG, S.; ZHU, L.; LI, F. et al. Isolating the impacts of land use/cover change and climate change on the GPP in the Heihe River Basin of China. **J. Geophys. Res. Biogeosci.**, v. 125, e2020JG005734, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JG005734>.

YUE, P.; ZHANG, Q.; ZHANG, L.; LI, H.; YANG, Y.; ZENG, J. et al. Long-term variations in energy partitioning and evapotranspiration in a semiarid grassland in the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 278, 10767, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107671>.

ZHA, T.; LI, C.; KELLOMÄKI, S.; PELTOLA, H.; WANG, K. Y.; ZHANG, Y. Controls of evapotranspiration and CO₂ fluxes from scots pine by surface conductance and abiotic factors. **PLoS One**, v. 8 (7), e69027, 2013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069027>.

ZHANG, Y. Q.; KANG, S. Z.; WARD, E. J.; DING, R. S.; ZHANG, X. et al. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors. **Agr Water Manage** 98: 1207–1214, 2011.

ZHANG, A. Z.; JIA, G. S. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. **Remote Sens. Environ.** 2013, 134, 12–23, 2013.

ZHANG, K.; KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. **Wiley Interdiscip. Rev. Water**, v. 3, p. 834–853, 2016. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>.

ZHANG, Y.; XIAO, X.; WU, X. et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. **Sci. Data**, v. 4, 170165, 2017. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.165>.

ZHAO, M. S.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R. Sensitivity of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. **J. Geophys. Res.**, v. 111, G01002, 2006.

ZHENG, Y.; SHEN, R.; WANG, Y.; LI, X.; LIU, S.; LIANG, S. et al. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its longterm variation, 1982–2017. **Earth Syst, Sci, Data**, v. 12, p. 2725–2746, 2020. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2725-2020>.

ZHOU, S. et al. Explaining inter-annual variability of gross primary productivity from plant phenology and physiology. **Agric For Meteorol** 226:246–256, 2016.

ZHOU, Y.; LI, X.; GAO, Y.; HE, M.; WANG, M.; WANG, Y. et al. Carbon fluxes response of an artificial sand-binding vegetation system to rainfall variation during the growing season in the Tengger Desert. **J. Environ. Manag.**, v. 266, 110556, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110556>.

ZHU, X.; PEI, Y.; ZHENG, Z.; DONG, J.; ZHANG, Y.; WANG, J. et al. Underestimates of grassland gross primary production in MODIS standard products. **Remote Sens.**, v. 10 (11), 1771, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10111771>.