

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

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Celina Cândida Ferreira Rodrigues

**PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA PARA ÁREAS
DE CANA-DE-AÇÚCAR E CERRADO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO MOGI-GUAÇU - SP**

Campina Grande, Fevereiro de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO

CELINA CÂNDIDA FERREIRA RODRIGUES

**PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA PARA ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E
CERRADO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO MOGI-GUAÇU - SP**

CAMPINA GRANDE, PB

2018

CELINA CÂNDIDA FERREIRA RODRIGUES

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

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Subárea: Sensoriamento Remoto Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

CAMPINA GRANDE, PB

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R696p Rodrigues, Celina Cândida Ferreira.
Produtividade primária bruta para áreas de cana-de-açúcar e cerrado na
bacia hidrográfica do Mogi-Guaçu - SP / Celina Cândida Ferreira
Rodrigues. – Campina Grande, 2018.
72 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva".
Referências.

1. GPP. 2. Eddy Covariance. 3. Sensoriamento Remoto. I. Silva,
Bernardo Barbosa da. II. Título.

CDU 551.5(043)

CELINA CÂNDIDA FERREIRA RODRIGUES

PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA PARA ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E
CERRADO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO MOGI-GUAÇU- SP

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2018

BANCA EXAMINADORA



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



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



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO VIEIRA DE AZEVEDO
Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

- Como sempre na minha vida, agradeço a Deus por me abençoar nessa caminhada.
- Ao meu orientador, prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pela grande oportunidade e por depositar bastante confiança em mim, além da amizade, simplicidade e incentivo.
- À minha mãe, que nas ações e gestos, nunca deixou faltar amor, compreensão, valores morais e incentivos.
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, que pelos seus ensinamentos e conhecimentos transmitidos, foram muito importantes em nossa formação acadêmica.
- Ao prof. Dr. Humberto Rocha e ao Laboratório de Biosfera-Atmosfera (IAG/USP), pela concessão dos dados.
- Aos meus amigos de curso, que colaboraram para um aproveitamento acadêmico no sentido de conhecimento e companheirismo.
- Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, pela atenção, dedicação e disposição com que sempre nos trataram durante nossa caminhada.
- Ao CNPq, pela bolsa concedida para realização do mestrado.

RESUMO

As florestas desempenham um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, atuando como grandes armazenadoras de carbono por meio de sua produtividade primária. A produtividade primária bruta corresponde ao total de carbono fixado pela vegetação por meio do processo de fotossíntese. Neste sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar a capacidade de fixação de carbono na bacia do rio Mogi-Guaçu, em especial nas áreas de cerrado e cana-de-açúcar no município de Santa Rita do Passa Quatro - SP, com base em estimativas efetivadas por meio de técnicas de sensoriamento remoto e proceder uma validação dos resultados segundo medidas realizadas pelo método da Eddy Coariance. Para a determinação da produtividade primária bruta foram determinados os balanços de radiação e energia por meio de imagens TM - Landsat 5 e OLI/TIRS - Landsat 8 utilizando a metodologia do SEBAL, para posterior comparação com a produtividade primária bruta do produto MOD17A2H e a estimada pelo método de eddy covariance. Foram selecionadas imagens sem presença de nuvens nos anos de 2005 e 2015, e empregadas as medições do fluxo de CO₂ obtidas em duas torres micrometeorológicas instaladas em área de cana-de-açúcar e de Cerradão. As imagens Landsat proporcionaram maior concordância entre os dados de produtividade primária bruta em relação aos obtidos nas torres micrometeorológicas, diferentemente dos valores gerados com o MOD17A2H. A sazonalidade da produtividade primária bruta apresenta boa correspondência com os dados de precipitação pluviométrica registrados na área de estudo. O cerrado se comportou como sumidouro de carbono durante todo o ano, mesmo com precipitação abaixo da média, o que evidencia a necessidade de preservação deste bioma.

Palavras chave: GPP, Eddy Covariance, sensoriamento remoto

ABSTRACT

The forests play an important role in the mitigation of climate change by acting as large carbon sinks through their primary productivity. The gross primary productivity corresponds to the total carbon fixed by the vegetation through the photosynthesis process. In this way, the objective of this work was to evaluate the carbon fixation capacity in the Mogi-Guaçu river basin, especially in the cerrado and sugar cane areas in the municipality of Santa Rita do Passa Quatro - SP, based on estimates made by means of remote sensing techniques and validate the results according to measurements performed by the Eddy Coariance method. For the gross primary productivity determination, the radiation and energy balances were determined using TM - Landsat 5 and OLI / TIRS - Landsat 8 images using the SEBAL methodology, for further comparison with the gross primary productivity of the product MOD17A2H and the estimated by the eddy covariance method. Images were selected without clouds in the years 2005 and 2015, and measurements of the CO₂ flux obtained in two micrometeorological towers installed in the area of sugarcane and Cerradão were used. The Landsat images provided greater agreement between the gross primary productivity data in relation to those obtained in the micrometeorological towers, unlike the values generated with the MOD17A2H. The seasonality of the gross primary productivity shows good correspondence with the rainfall data recorded in the study area. The cerrado has behaved as a carbon sink throughout the year, even with below-average precipitation, which it evidences the need for preservation of this biome.

Keywords: GPP, Eddy Covariance, remote sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa dos diferentes biomas do Brasil	20
Figura 2: Variação do porte e estrutura de cerrados	21
Figura 3: Área plantada com cana-de-açúcar (hectares) nos biomas brasileiros – 2015	23
Figura 4: Perturbações no ciclo global do carbono ocasionado por atividades antrópicas. Médias globais para a década de 2007 a 2016. (GtCO ₂ /year)	24
Figura 5: Produtividade primária bruta particionada em respiração e produtividade primária líquida.....	26
Figura 6: Localização da área de estudo com destaque para os pontos de localização das torres micrometeorológicas	31
Figura 7: Fluxograma do processo de obtenção da GPP por imagens Lansat 5 e 8	37
Figura 8: Médias mensais das variáveis meteorológicas, temperatura do ar (T) (a), radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (b) e umidade relativa do ar (UR) (c), para Santa Rita do Passa Quatro – SP, linhas cinzas (fevereiro 2005 a janeiro 2006) e linha preta (2015)	42
Figura 9: - Precipitação total mensal para o período fevereiro 2005 a janeiro 2006 e para o ano de 2015.....	43
Figura 10: Fluxos de energia (W m ⁻²) para o período de fevereiro de 2005 a janeiro de 2006: saldo de radiação (Rn) (a), fluxo de calor no solo (G) (b), fluxo de calor sensível (H) (c) e fluxo de calor latente (LE) (d)	44
Figura 11: Energia disponível (Rn – G) e os fluxos turbulentos (LE + H) para o fechamento do balanço de energia (BE), a) cana-de-açúcar, b) cerrado	46

Figura 12: Comparação dos dados do Landsat 5 e 8, MOD17A2H e Torre, para 2005 e 2015, sendo a) cana-de-açúcar_2005, b) área de cerrado_2005 e c) cerrado_2015	50
Figura 13: GPP diário (g C m^{-2}), com imagens TM, ano 2005. (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84)	51
Figura 14: GPP (g C m^{-2}), com imagens OLI, ano 2015. (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84)	52
Figura 15: NEE médio mensal ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para a) cana-de-açúcar e b) cerrado, hora do dia (eixo x), mês do ano (eixo y)	54
Figura 16: Média mensal das variações de CO_2 - NEE ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) para: a) cana-de-açúcar; e b) cerrado, de fevereiro de 2005 a janeiro de 2006	55
Figura 17: Valor total mensal da produtividade primária líquida - NPP e da respiração - Re para: a) cana-de-açúcar; e b) cerrado	57
Figura 18: Relação entre radiação fotossinteticamente ativa - PAR e radiação global - Rg com dados medidos no período compreendido entre fevereiro de 2005 a fevereiro de 2006, em Santa Rita do Passa Quatro – SP	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sensores das torres micrometeorológicas para o Cerrado e cana de açúcar	33
Tabela 2: Imagens selecionadas do Landsat 5 para Santa Rita do Passa Quatro - SP, 2005. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do sol (E); distância relativa terra-sol (Dr); ângulo zenital solar (Cos Z)	34
Tabela 3: Imagens selecionadas do Landsat 8 para Santa Rita do Passa Quatro - SP, 2015. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do sol (E); distância relativa terra-sol (Dr); ângulo zenital solar (Cos Z)	35
Tabela 4: Dados diário da produtividade primária bruta (g C m^{-2}) para Cerrado e cana-de-açúcar, com TM - Landsat 5, OLI – Landsat 8, MOD17A2H e Eddy Covariance (EC)	48
Tabela 5: Erro médio absoluto (EMA) (g C m^{-2}), erro médio percentual (EMP) (%) e raiz do erro quadrático médio (REQM) (g C m^{-2}) associado com GPP obtido por Landsat e pelo MOD17A2H, para cana-de-açúcar e cerrado	49
Tabela 6 - Estatísticas comparativas para o desempenho da relação $\text{PAR} = 0.3787 \text{ Rg}$ e $\text{PAR} = 48 \text{ Rg}$ para Santa Rita do Passa Quatro – SP, Cerrado	59
Tabela 7 - Estatísticas comparativas para o desempenho da relação $\text{PAR} = 0.3787 \text{ Rg}$ e $\text{PAR} = 48 \text{ Rg}$ para Santa Rita do Passa Quatro – SP, cana-de-açúcar	60
Tabela 8: Erro médio percentual (EMP) referentes ao impacto na GPP, ocasionado por mudança nas variáveis envolvidas no cômputo através de sensoriamento remoto, para o ano de 2005	61
Tabela 9: Erro médio percentual (EMP) referentes ao impacto na GPP, ocasionado por mudança nas variáveis envolvidas no cômputo através de sensoriamento remoto, para o ano de 2015	61

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer

DGI - Divisão de Geração de Imagens

DOA – Dia de ordem do ano

EC – Eddy Covariance

EMA – Erro médio absoluto

EMP – Erro médio percentual

ESDIS - Earth Science Data and Information System

GEE – Gases de efeito estufa

GPP - Produtividade Primária Bruta

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LUE - Light Use Efficiency

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI - Índice de vegetação da diferença normalizada

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

NEP - Produtividade Líquida do Ecossistema

NEE - Troca Líquida do Ecossistema

OLI - Operational Land Imager

OLI/TIRS - Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor

PAR – Photosynthetically active radiation

PIB – Produto interno bruto

REQM - Raiz do erro quadrático médio

RFAA - Radiação fotossinteticamente ativa absorvida

SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land

TM - Thematic Mapper

USGS - United States Geological Survey

VPM - Vegetation Photosynthesis Model

CH₄ - Metano

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

Cos Z – Cosseno do ângulo zenital solar

ε - Eficiência do uso da luz

ε_{\max} - Eficiência máxima de uso da luz

Dir - Direção do vento

Dr – Distância relativa Terra Sol

E - Ângulo de elevação do Sol

FC – Fluxo de CO₂

FE – Fração evaporativa

G - Densidade de fluxo de calor no solo

H₂O - Água

Ki – Irradiância solar global incidente

Kr – Irradiância solar global refletida

PAR - Radiação fotossinteticamente ativa

PARi – PAR incidente

PARr – PAR refletida

Patm – Pressão atmosférica

Prec – Precipitação

R_A – Respiração autotrófica

R_E – Respiração do ecossistema

R_g – Radiação global

R_H – Respiração heterotrófica

R_n - Saldo de radiação

T_a – Temperatura do ar

T_{opt} - Temperatura média do ar do mês de máximo NDVI

T_{dia} - Temperatura média diária do ar

UR – Umidade relativa

U – Velocidade do vento

Xest – Valores estimados

Xobs – Valores observados

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 BIOMA CERRADO	19
2.2 CANA-DE-AÇÚCAR	21
2.3 CARBONO	23
2.4 DINÂMICA DO CARBONO	25
2.5 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
3.2 TORRES MICROMETEOROLÓGICAS	32
3.3 IMAGENS LANDSAT 5	34
3.4 IMAGENS LANDSAT 8	35
3.5 IMAGENS MODIS – PRODUTO MOD17A2H	35
3.6 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA	36
3.6.1 GPP POR EDDY COVARIANCE	36
3.6.2 GPP POR IMAGENS LANDSAT	37
3.6.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 DADOS METEOROLÓGICOS	41
4.2 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS NO BALANÇO DE ENERGIA	43
4.3 BALANÇO DE ENERGIA	45
4.4 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA (GPP).....	47
4.5 ANÁLISE DA TROCA LÍQUIDA DE CO ₂ (NEE)	53
4.6 PROCESSOS DE ABSORÇÃO E LIBERAÇÃO DE CO ₂	56
4.7 IMPACTOS DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA NA GPP	58

4.8 ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DA GPP ÀS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO SEU CÔMPUTO ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO REMOTO	60
5 CONCLUSÕES	62
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 Introdução

O avanço das atividades antropogênicas tem ocasionado uma modificação da vegetação nativa, alterando o microclima local e sua biodiversidade. Alterações globais do clima têm sido verificadas durante o último século, principalmente pelo aumento da temperatura média global do ar de 0,84 °C no período 1880-2017 (NOAA, 2017). A principal causa atribuída ao aquecimento global, de acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC, é o aumento de emissões de Gases de Efeito Estufa - GEE na atmosfera, em especial o que tem se constatado desde o período pré-industrial até a atualidade. Destaca-se o gás carbônico (CO₂), um dos mais importantes GEE, que teve um aumento superior a 40% desde o período pré-industrial. Além disso, o CO₂ participa dos processos de fotossíntese e respiração o que evidencia a sua importância para a vida no planeta Terra.

As florestas desempenham um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, atuando como grandes armazenadoras de carbono por meio de sua produtividade primária. A produtividade primária bruta - GPP (do inglês *Gross Primary Production*) corresponde ao total de carbono fixado pela vegetação através do processo de fotossíntese. A GPP está diretamente relacionada ao carbono efetivamente extraído da atmosfera pelos diferentes ecossistemas terrestres. Segundo Canadell et al. (2007) as florestas são responsáveis pelo sequestro de 1/3 das emissões antropogênicas de carbono. A preocupação sobre o aumento da concentração de CO₂ vem impulsionado pesquisas sobre o sequestro deste gás por diferentes biomas.

O crescimento populacional, a busca por novas áreas para expansão agropecuária, a extração de madeiras, dentre outros fatores, tendem a aumentar a ocupação de terras sobre diferentes biomas brasileiros. Dentre estes biomas tem-se o Cerrado, que é o segundo maior bioma brasileiro, sendo menor apenas que a Floresta Amazônica (VOURLITIS e DA ROCHA, 2010), e que vem sofrendo com a ação antrópica desde a década de 1960, com a concessão de incentivos fiscais para projetos agropecuários na região Sudeste do país.

No estado de São Paulo grandes extensões da vegetação primária foram transformadas em agro ecossistemas e a cana-de-açúcar passou a ocupar os solos mais férteis de áreas em que predominavam o Cerrado. Isto resultou em mudanças importantes nas trocas de calor e massa que se processam na Camada Limita Planetária. Dentre esses fluxos, destaca-se o de carbono, pois pode levar a uma perda líquida de carbono da biomassa e diminuir o estoque de carbono no solo (FEARNSIDE, 2001; GOMES, 2009). Ao se avaliar a GPP no bioma Cerrado e em

pastagens gera-se subsídio para melhor compreensão dos fatores que influenciam a sazonalidade do GPP e até mesmo para promover a sustentabilidade destes ecossistemas. Há poucos registros do papel desempenhado pelos cultivos de cana-de-açúcar no Cerrado brasileiro, no que concerne ao sequestro de carbono.

1.1 Objetivo Geral

Neste sentido, o objetivo geral da presente investigação é avaliar a capacidade de fixação de carbono nas áreas de cerrado e cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Mogi-Guaçu - SP, com base em estimativas efetivadas por meio de técnicas de sensoriamento remoto e proceder a validação dos resultados segundo medidas realizadas pelo método de Eddy Covariance - EC.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar as variáveis do balanço de energia;
- Determinar a GPP com sensoriamento remoto e com dados das torres micrometeorológicas;
- Comparar dados de GPP obtidos com base em medições multiespectrais dos sensores TM e OLI do Landsat 5 e 8, com dados derivados do produto MOD17A2H e do método EC.
- Analisar as séries de GPP medidas pelo método EC nos dois sítios experimentais;
- Analisar os processos de absorção e liberação de CO₂ no ecossistema em estudo;
- Avaliar o comportamento sazonal da GPP;
- Adotando a GPP torre como referência, aplicar as métricas EAM, EMP, REQM;
- Analisar a sensibilidade da GPP às variáveis envolvidas no seu cômputo através do sensoriamento remoto;
- Avaliar o impacto da radiação fotossinteticamente ativa na GPP;

2 Revisão da literatura

2.1 Bioma Cerrado

O Brasil apresenta uma grande variedade de biomas: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal (FIGURA 1). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), elementos climáticos como: temperatura, pluviosidade e umidade relativa, juntamente com características do solo e topografia, delimitam a localização geográfica dos biomas, que abrigam diferentes tipos de vegetação e de fauna.

O Cerrado, considerado como “savana tropical”, é o segundo maior bioma da América do Sul, sendo superado apenas pelo bioma Amazônia. Ele ocupa uma área de 2.036.448 km², o que representa cerca de 22% do território nacional e ocorre desde as regiões marginais na Floresta Amazônica, no norte do país, até as áreas do Sudeste e Sul, como São Paulo e Paraná. O Cerrado é formado principalmente por gramíneas, pequenas palmeiras e pequenas árvores de aparência retorcida. De acordo com o porte e a estrutura, podem-se distinguir diferentes tipos de cerrados (Figura 2): Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Cerrado, Cerrado *Stricto Sensu* e Cerradão (COUTINHO, 1978; EITEN, 1981).

No Campo Limpo são encontrados predominantemente herbáceas, com raros arbustos e ausência de árvores. O restante da área é coberta por formas fisionômicas menos representativas. O Campo Sujo é estruturado por herbáceas arbustivas, com arbustos esparsos e subarbustos. É formado pelos tipos menos desenvolvidos do Cerrado *Stricto Sensu* e a vegetação lenhosa apresenta altura de 2 m e cobertura na faixa de 5%.

O Campo Cerrado é um subtipo da vegetação arbórea-arbustiva, com cobertura na faixa de 2 a 20% e altura média de 2 a 3 m. Cerrado *Stricto Sensu* é caracterizado por árvores baixas e tortas, com ramificações irregulares e retorcidas. Os arbustos são esparsos e apresentam um dossel descontínuo com cobertura arbórea de 20 a 50%. A altura média das árvores é de 3 a 6 m.

O Cerradão é uma floresta com aspectos xeromórficos e contém espécies do Cerrado *Stricto Sensu* e das Florestas Tropicais. A copa das árvores é contínua, com cobertura arbórea variando entre 50 a 90% e altura média de 8 a 15 m, proporcionando condições de luminosidade que favorecem a formação de extratos arbustivos e herbáceos diferenciados.

Atualmente, os cerrados são objetos de ocupação agrícola intensa, sujeitos a queimadas contínuas em épocas da seca, o que contribui para o seu empobrecimento e redução acelerada.

Este bioma é um dos mais ameaçados pelas atividades antrópicas, com destaque para a ocupação agrícola como soja, cana-de-açúcar e pastagens (FERREIRA, 2003; FERREIRA & TROPPEMAIR, 2003; SANO et al., 2010).

Apesar da intervenção humana, o Cerrado ainda reúne parte significativa da flora e fauna brasileiras. Segundo Myers et al. (2000), trata-se de um dos principais ecossistemas tropicais da Terra, sendo um dos centros prioritários ("hot spots") para a preservação da biodiversidade do planeta. No entanto, apenas 20% da sua região permanecem intocados e somente 1,2% é preservada em áreas protegidas (MITTERMEIER et al., 2000). Devido ao intenso processo de antropização (nas últimas 5 décadas, aproximadamente), grande parte do Cerrado foi convertido em áreas de pastagens e agricultura (MACHADO et al., 2004; SANO et al., 2010).

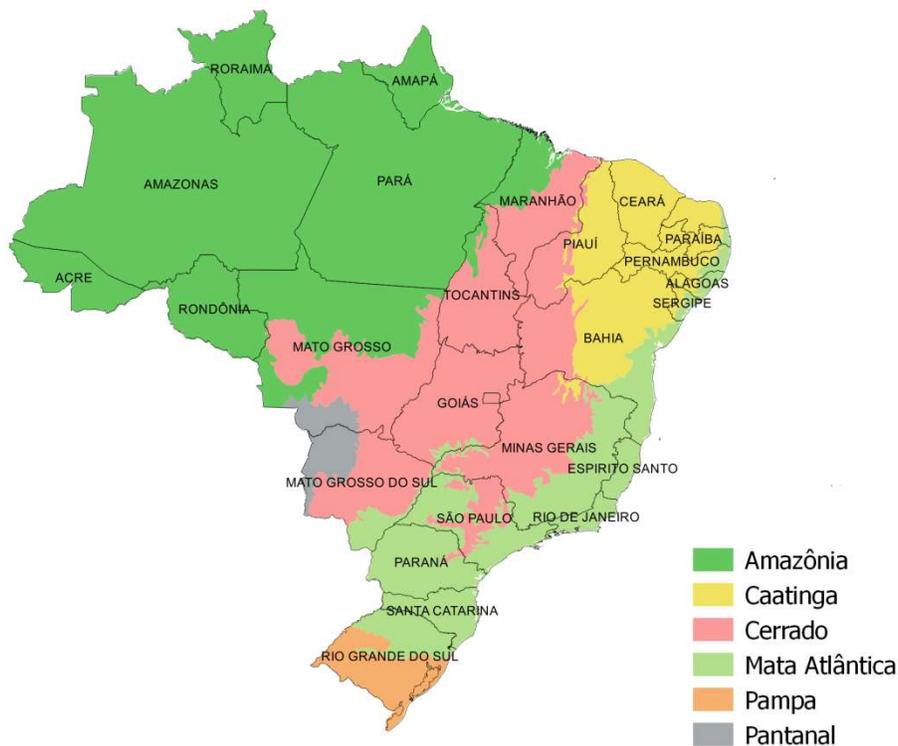


Figura 1: Mapa dos diferentes biomas do Brasil

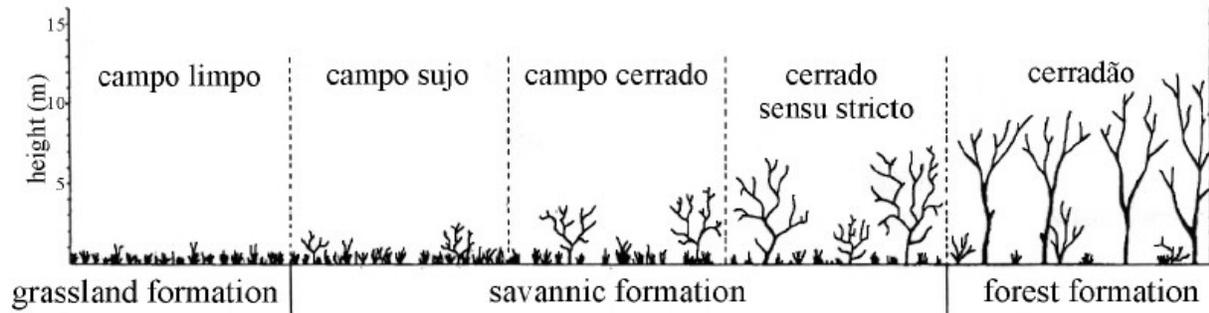


Figura 2: Variação do porte e estrutura de cerrados. Fonte: Miranda et al. (1996)

2.2 Cana-de-açúcar

Uma das culturas que têm sido plantadas no cerrado é a cana-de-açúcar, de acordo com o IBGE, 2017. Atualmente, a cana-de-açúcar é o terceiro maior cultivo brasileiro em área plantada, ficando atrás apenas da soja e do milho. No terceiro trimestre de 2016, a cana gerou um produto de R\$ 152,3 bilhões, mais de 1/5 do Produto Interno Bruto - PIB do agronegócio brasileiro, naquele período. Segundo a Conab e o Ministério de Agricultura, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. O aumento da demanda mundial por etanol, oriundo de fontes renováveis, aliado às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, tornam o Brasil um país promissor para a exportação dessa *commoditie*. Praticamente toda a produção de cana-de-açúcar do país advém da região entre o centro e o sul, especialmente, o estado de São Paulo (o maior produtor), onde vários municípios têm grandes áreas de plantio e várias usinas instaladas. Segundo informações do IBGE, o Brasil em 2015 contava com 10.870.647 ha plantados com cana-de-açúcar, sendo o estado de São Paulo contemplado com 5.728.285 ha, representando 53% do total da área plantada no país (Figura 3).

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene pertencente à mesma família do trigo, do milho, da aveia e outras plantas fundamentais para as populações humanas. A cana-de-açúcar é uma gramínea C4, e essa espécie consegue converter uma boa parte da radiação solar em biomassa, devido à sua alta atividade fotossintética. Segundo o IBGE, a cana-de-açúcar se insere na categoria da lavoura temporária, com ciclo regular, sendo seu período de curta e média duração. No estado de São Paulo, o plantio da cana-de-açúcar ocorre entre os meses de janeiro e abril, indicando a predominância do sistema de cultivo de 18 meses, com colheita entre setembro e outubro do ano seguinte. Por ser uma cultura perene, cultivada em extensas áreas, favorece o

estudo através das imagens de satélite (RUDORFF et al., 2009).

O monocultivo de cana-de-açúcar pode influenciar o clima regional através de alterações que venham a promover no balanço de energia, podendo afetar as propriedades dos fluxos atmosféricos, entre estes o fluxo de carbono, pois pode levar a uma perda líquida de carbono da biomassa e diminuir o estoque de carbono no solo (FEARNSIDE, 2001).

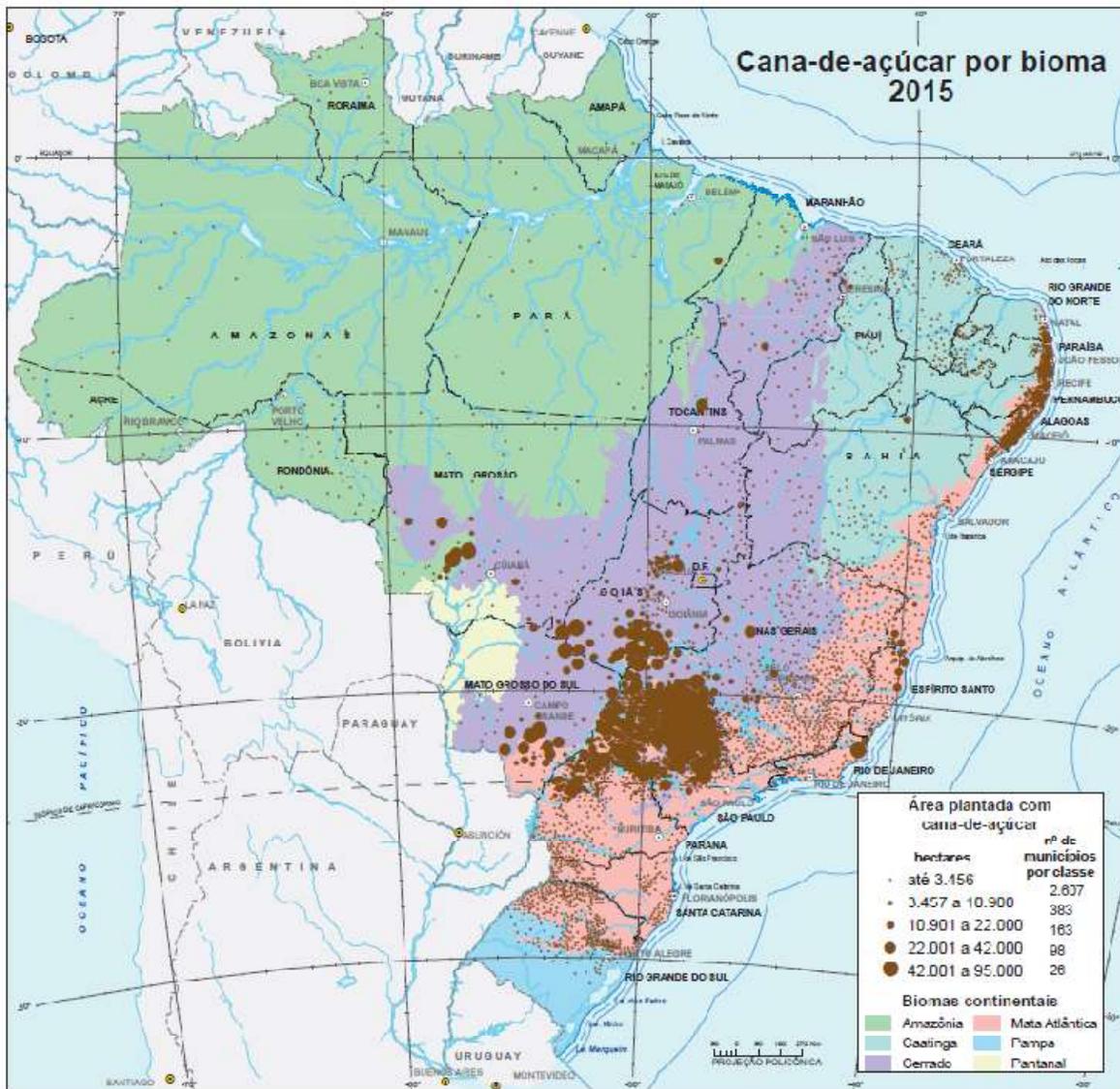


Figura 3: Área plantada com cana-de-açúcar (hectares) nos biomas brasileiros – 2015 (IBGE, 2015)

2.3 Carbono

O carbono é essencial para a existência da vida, pois participa da composição química de todos os componentes orgânicos atualmente conhecidos (RAMPELOTTO, 2012). O ciclo do carbono consiste no fluxo deste elemento químico entre os diferentes componentes da Terra (atmosfera, oceano, biosfera e litosfera). O mesmo pode ser dividido em três classes de processos: (1) reações assimilativas e desassimilativas, como a fotossíntese e a respiração, são os principais fenômenos do ciclo do carbono; (2) as trocas de dióxido de carbono entre a atmosfera e os oceanos; e (3) a precipitação de sedimentos de carbonato nos oceanos. Na escala global, os principais reservatórios de carbono são os oceanos, seguidos pelas formações geológicas, os solos, a atmosfera e a vegetação (MACHADO, 2005). Segundo Odum (1983), embora o depósito de carbono atmosférico venha a ser pequeno em relação aos demais reservatórios, ele é muito ativo e vulnerável às perturbações antrópicas, como mostra a Figura 4.

Na atmosfera, o carbono está presente principalmente na forma de dióxido de carbono (CO_2), que além de ser o principal componente da fotossíntese, é capaz de absorver radiação, sendo portanto um gás de efeito estufa (GEE). Na atmosfera há outras formas de carbono em menor quantidade, como o monóxido de carbono (CO) e o metano (CH_4). O efeito estufa torna possível a vida na terra, pois mantém a sua temperatura dentro de um intervalo favorável à vida.

Porém, as atividades antrópicas, como desmatamento, queima de combustíveis fósseis e poluição, vem aumentando a concentração de CO_2 na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global e crescimento de eventos meteorológicos extremos, sendo uma ameaça aos biomas da terrestres. A Administração Nacional de Oceano e Atmosfera (NOAA do inglês National Oceanic and Atmospheric Administration) evidenciou um aumento superior a 40% na concentração de CO_2 desde o período industrial. Esses valores aumentaram de 278 ppm em 1750 para 408,05 ppm em 2018. A preocupação com o aquecimento global tem impulsionado pesquisas para entender o potencial dos ecossistemas terrestres, especialmente florestas, para reduzir os níveis de CO_2 .

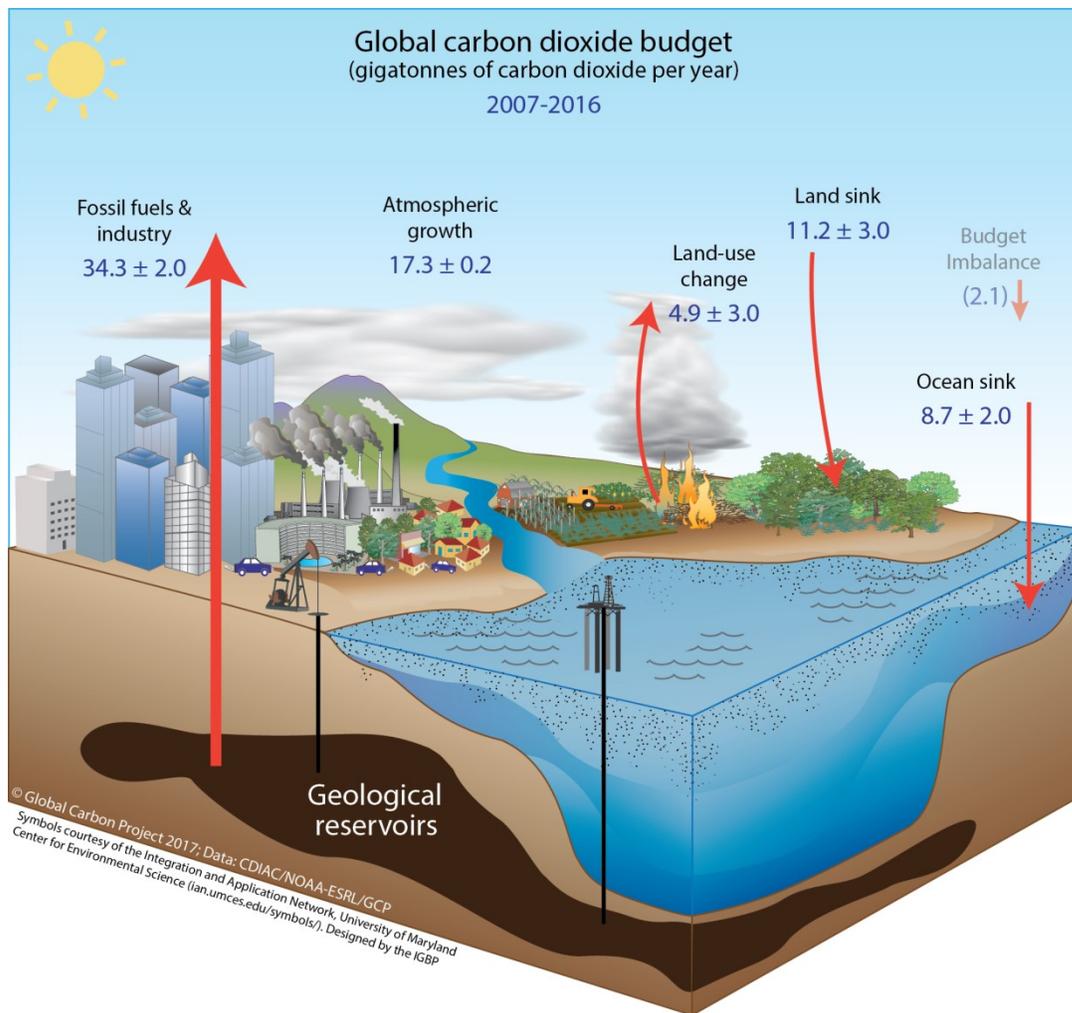


Figura 4: Perturbações no ciclo global do carbono ocasionado por atividades antrópicas. Médias globais para a década de 2007 a 2016 em GtCO₂/year

2.4 Dinâmica do Carbono

O fluxo de gás carbônico entre o ecossistema e a atmosfera é conhecido como Troca Líquida do Ecossistema (ou Net Ecosystem Exchange - NEE, denominação inglesa do conceito) e neste caso considera-se todo e qualquer tipo de gases compostos por carbono, até mesmo partículas de carbono presentes em queimadas, deposição vinda da água e intervenção antropogênica (OLIVEIRA, 2010).

O fluxo de dióxido de carbono que é fixado pela vegetação pode ser definido como Produtividade Primária Bruta (ou *Gross Primary Production* – GPP, denominação inglesa) enquanto que aquele que resulta da respiração do ecossistema de R_E (Equação 1) (THENKABAIL, 2015). Os componentes de R_E ($R_H + R_A$) resultam da decomposição de matéria orgânica, da respiração heterotrófica (R_H) e do componente autotrófico (R_A) (CABRAL et al., 2013).

A Produtividade Líquida do Ecossistema (*Net Ecosystem Production* - NEP, denominação do inglês) (Equação 2) pode ser dada pela diferença entre a Produtividade Primária Bruta e a Respiração Autotrófica, e esta difere da NEE (= GPP - R_E) pela respiração heterotrófica (CABRAL et al., 2013; CHAPIN et al., 2011).

$$NEE = GPP - R_E \quad (1)$$

$$NEP = GPP - R_A \quad (2)$$

Quando a NEE é negativa tem-se que o ecossistema é uma fonte de carbono, ou seja, consumindo mais carbono do que liberando. Se NEE for positivo, tem-se que este ecossistema é sumidouro de carbono.

Avaliando este processo em relação à atmosfera, utiliza-se o *Net Ecosystem Production* (NEP), sendo este o inverso de NEE. Assim, a Equação 2 é resumida a:

$$NEE = - NEP \quad (3)$$

Quando tem-se um NEP negativo, significa que a atmosfera está recebendo carbono e, portanto o ecossistema está liberando carbono para o ar. Na situação contrária, com NEP positivo, a atmosfera está perdendo carbono e conseqüentemente o ecossistema está absorvendo.

2.5 Produtividade Primária Bruta (GPP)

A Produtividade Primária Bruta (GPP) representa o total de carbono fixado pela vegetação, ou seja, é o total de energia assimilada pelas plantas durante o processo de fotossíntese (YUAN et al., 2010). Sabe-se que as plantas usam parte dessa energia para manter suas necessidades metabólicas através da respiração, e parte é acumulada como biomassa (Figura 5). A diferença entre a GPP e a R_m representa a Produtividade Primária Líquida, em outras palavras, é a energia acumulada na biomassa das plantas. De acordo com o nosso entendimento, a $GPP - R_m$, e que R_m é a respiração de manutenção, é igual à Fotossíntese Líquida, que é uma das camadas que integram o produto MOD17A2. A NEE, por sua vez, é obtida anualmente com resultado da $GPP - R_g$, em que R_g é a respiração produzida no processo de crescimento das plantas, mais a de manutenção das células vivas das árvores.

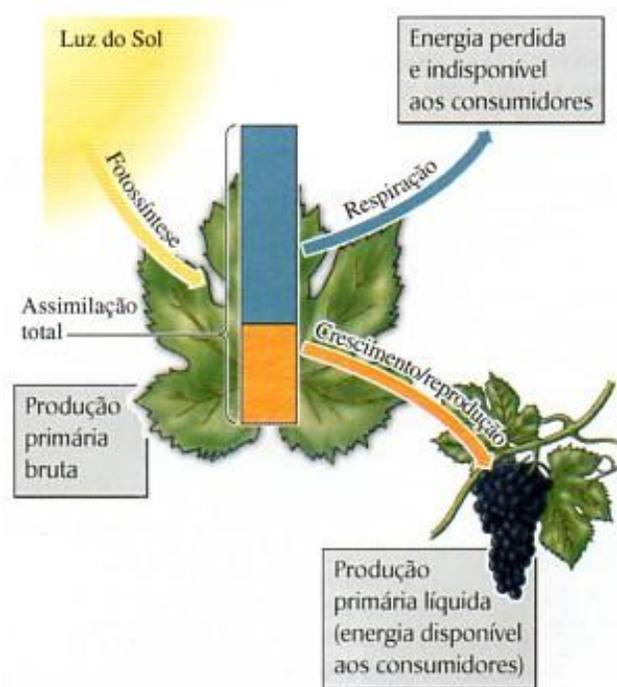


Figura 5: Produtividade primária bruta particionada em respiração e produtividade primária líquida (Fonte: Ricklefs, 2010)

Existem diversos métodos destinados à quantificação do carbono estocado na vegetação (GALLONet et al., 2006; LEFSKY et al., 2005; SANTOS & COSTA, 2003), dentre os quais se destaca a técnica de Eddy Covariance, considerada o melhor método micrometeorológico para quantificar os fluxos de CO₂ e vapor d'água (H₂O) em diversos ecossistemas florestais (ROCHA et al., 2002; BALDOCCHI, 2003; AGUIAR et al., 2006; BEER et al., 2010; CABRAL et al., 2011, LIU et al., 2015; MADUGUNDU et al., 2017). Esta técnica consiste na medição da assimilação de CO₂ e respiração em curtos períodos de tempo, numa escala espacial pequena, podendo ser fragmentos de uma floresta e ou campo agrícola ou de pastagem. Esta medição se dá através de sensores instalado sem uma torre micrometeorológica que quantificam a densidade de fluxo vertical de CO₂ acima da vegetação. Segundo Ricklefs (2010), a técnica de Eddy Covariance - EC, possibilita definir o quanto a temperatura e a precipitação controlam a GPP e afetam a respiração, além de avaliar o impacto do clima sobre a produtividade.

Rodda et al. (2016) utilizaram EC para medir fluxo de CO₂ e vapor d'água em uma área de mangue em Sundarbans - Índia, durante o período abril de 2012 a março de 2013. O objetivo da pesquisa destes autores foi entender as trocas de CO₂ e energia entre a atmosfera e a vegetação de mangue. O fluxo de CO₂ foi particionado em GPP e respiração, enquanto a energia disponível ($R_n - G$) foi repartida em calor sensível e latente ($H + LE$). O estudo destacou que os mangues de Sundarbans têm substancial importância para o estoque de carbono, indicando que a proteção dessa floresta compreende importante estratégia da redução de emissões de dióxido de carbono.

Apesar da técnica de EC ser considerada de grande valor junto à comunidade científica, esta demanda alto custo de instalação e manutenção dos equipamentos, além de pessoal técnico mais qualificado, sendo por isso mesmo, menos difundida e empregada nas pesquisas em países em desenvolvimento. Outro fator limitante desta técnica é a sua representatividade espacial, que cobre apenas alguns quilômetros quadrados, salvo nos casos de áreas extensas e homogêneas.

O sensoriamento remoto tem sido cada vez mais utilizado para estimar as trocas de carbono entre vegetação e atmosfera em escalas regional e global (XIAO et al., 2004; ZHAO et al., 2005; SIMS et al., 2008; PAN et al., 2014; WU et al., 2009; SILVA et al., 2013, VERMA et al., 2015). As técnicas que empregam o sensoriamento remoto apresentam como grande vantagem a ampla cobertura espacial, baixo custo e sua maior operacionalidade. O sensoriamento remoto é uma técnica de aquisição ou medição de informações das propriedades

físicas, químicas e biológicas de um objeto sem contato físico direto. Isto é feito a partir da detecção e registro da energia eletromagnética emitida e/ou refletida pelo objeto (LONGLEY et al., 2005). Estas informações podem ser coletadas por sensores instalados a bordo de satélites, o que caracteriza o sensoriamento remoto orbital que, através deste procedimento, gera imagens com base na resposta espectral da região imageada (LILLESAND e KIEFER, 1993).

Diversos sensores orbitais têm sido empregados na determinação da GPP, como o AVHRR (KITAMOTO et al., 2007; NASCIMENTO, 2011), o TM / ETM+ / OLI da série Landsat (GITELSON et al., 2008; SILVA et al., 2013) e o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (RUNNING et al., 2004; SAKAMOTO et al., 2011; JIANG et al., 2013). Muitas dessas técnicas se fundamentam no conceito de eficiência de uso da luz – LUE (do inglês *Light Use Efficiency*) proposto por Monteith (1972). A sua aplicação prática resultou da grande contribuição dada por Field et al. (1995). Já Bastiaanssen & Ali (2003) apresentaram contribuição significativa ao empregar o conceito de fração evaporativa com vistas a contabilizar o fator água no processo de fixação do carbono por parte da vegetação.

Os parâmetros físicos, químicos e biológicos que regulam a fotossíntese, podem ser obtidos por meio de dados do sensoriamento remoto. Bastiaanssen et al. (1998) propuseram um algoritmo destinado a proceder o balanço de energia na superfície do nosso planeta denominado de SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), que necessita fundamentalmente de imagens orbitais e alguns poucos dados complementares de superfície, como radiação solar global, velocidade do vento e temperatura do ar. Embora o mesmo venha sendo usado principalmente na determinação da evapotranspiração, pode-se usar a influência do fator água na composição da GPP pela fração evaporativa, uma das componentes do SEBAL.

A estimativa da GPP baseia-se fundamentalmente na relação entre a eficiência de uso da luz (ϵ) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação (RFAA), sendo esta última dependente de algum índice de vegetação e da radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA). Um dos desafios para o cômputo de ϵ consiste em se obter o seu valor máximo (ϵ_{\max}), que é específico de cada bioma ou tipo de vegetação (THENKABAIL, 2015), uma vez que o ϵ_{\max} muda com o tipo de vegetação, estado fenológico, temperatura, disponibilidade de água e tipo de metabolismo da planta (HOODA & DYE, 1996). Outro importante fator relacionado com a GPP são os ponderadores ambientais, sendo que os principais são a temperatura do ar e a disponibilidade hídrica da planta (FIELD et al., 1995). No MOD17, o

ponderador de água é o déficit de pressão de vapor do ar, enquanto que outras técnicas usam a fração evaporativa (BASTIAANSEN e ALI, 2003; SILVA et al., 2013). Outro elemento chave na modelagem da GPP é a PAR (radiação fotossinteticamente ativa), em virtude de seu papel na fotossíntese e dada sua dependência das condições de tempo reinantes em dado local e área.

Silva et al. (2013) determinaram a Produtividade Primária Bruta por meio de imagens TM em uma perímetro irrigado localizado em São Gonçalo no estado da Paraíba, e compararam os resultados com os obtidos através do produto MOD17A2, que fornece dados de GPP em uma composição de 8 dias com 1 km de resolução espacial. Os autores verificaram pouca diferença entre a GPP estimada e os valores oriundos do produto MOD17A2, o que não houve entre a área irrigada e não irrigada da cena de estudo. Com o estudo foi evidenciado o grande potencial das áreas irrigadas naquele perímetro para sequestro de carbono e destacaram com a pesquisa a importância da irrigação na fixação de carbono no Semiárido brasileiro.

Madugundu et al. (2017) obtiveram a GPP de um cultivo de milho irrigado para uma fazenda localizada na região leste da Arábia Saudita em condições áridas. Comparou-se o modelode fotossíntese da vegetação - VPM (do inglês: *Vegetation Photosynthesis Model*) com base na reflectância de bandas do OLI – Landsat 8, com o EC durante agosto e novembro de 2015. Constatou-se que o VPM teve boa concordância com os dados do EC, uma vez que apresentou Erro Relativo Médio de 6% em relação aos valores do EC.

3 Material e Métodos

3.1 Descrição da área de estudo

A área estudada localiza-se no município de Santa Rita do Passa Quatro (21° 42' 37" S, 47° 28' 41" O, 748 m) no estado de São Paulo, conforme apresentado na Figura 6. Ela possui uma área de 754,9 km² e uma população estimada em 2017 de 27.590 habitantes (IBGE, 2010) e localiza-se a 77 km do município de Ribeirão Preto e 253 km da capital. O município pertence à Bacia Hidrográfica do rio Mogi-Guaçu, que integra a Unidade de Gerenciamento das Bacias Hidrográficas dos rios Mogi-Guaçu e Pardo e forma, no contexto regional, um dos mais importantes polos socioeconômicos do interior do estado (BRASIL – MME, 2000).

A localidade de Santa Rita do Passa Quatro foi denominada como Estância Climática pela Lei Estadual nº 719, de 1º de junho de 1950, (LOSSARDO, 2010). O clima da região é tipicamente ameno e seco durante o inverno e quente e úmido durante o verão (ROCHA et al., 2002), com temperaturas médias mensais que variam entre 19 a 24 °C. A precipitação pluviométrica média anual é de 1498 mm (PIRES NETO et al., 2005).

Na área de estudo há existência de uma reserva legal denominada Cerrado Pé-de-Gigante, uma das seis glebas disjuntas que constituem o Parque Estadual de Vassununga, criado em 26/10/1970 através do Decreto Federal 52.546, sendo administrado pelo Instituto Florestal da Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA) do estado de São Paulo. O nome Pé-de-Gigante se deve a um rebaixamento no interior da unidade de conservação com o aspecto de uma pegada gigante, provavelmente causado por erosão das cabeceiras do córrego Paulicéia (PIVELLO et al., 1998).

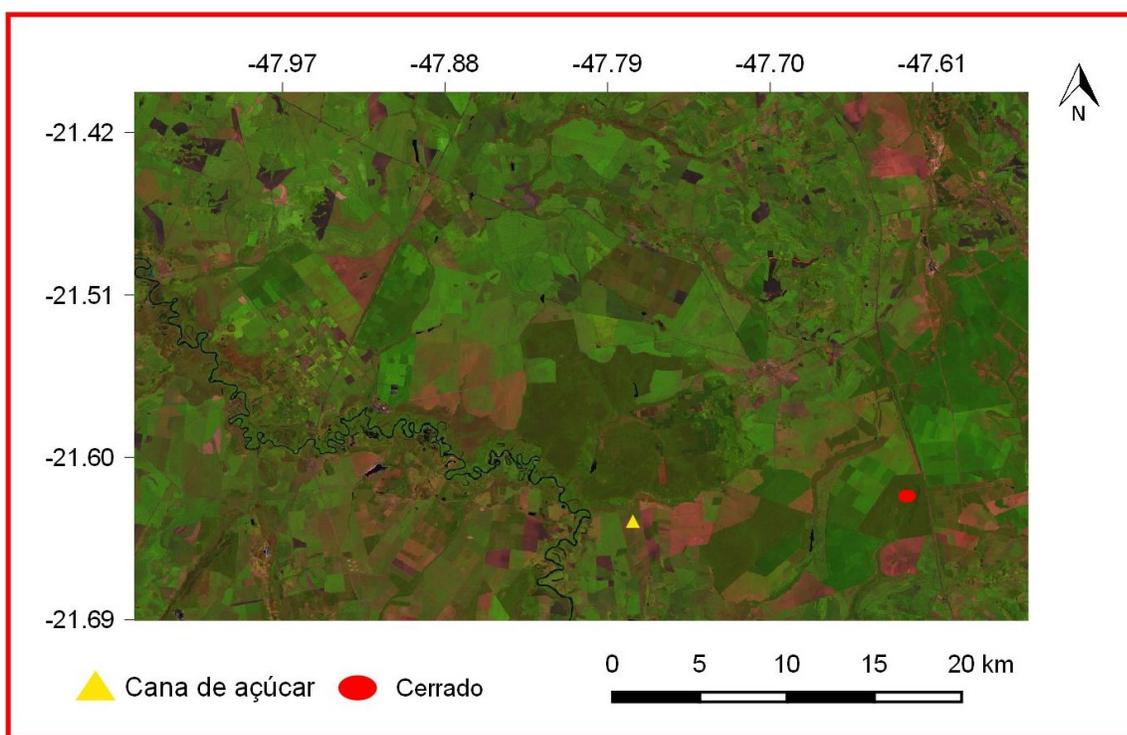


Figura 6: Localização da área de estudo com destaque para os pontos de localização das torres micrometeorológicas

3.2 Torres Micrometeorológicas

Utilizaram-se dados micrometeorológicos para calibração e validação do algoritmo SEBAL, obtidos em duas torres instaladas em diferentes biomas (cerrado e cana-de-açúcar), referentes ao período de 07 de fevereiro de 2005 à 06 de fevereiro de 2006 e os dias 23 de abril, 09 e 25 de maio, 10 e 26 de junho, 28 de julho e 16 de outubro de 2015. Os dados foram cedidos pelo Laboratório de Biosfera-Atmosfera (IAG/USP).

A localização das torres micrometeorológicas está representada na Figura 6. A torre do bioma Cerrado localiza-se na Gleba Pé de Gigante (21° 37' 9, 26" S; 47° 37' 56,38" W; 710 m), que possui aproximadamente 1060 ha e faz parte do município de Santa Rita do Passa Quatro, SP. A fisionomia predominante na área é de cerrado *stricto sensu*, com altura do dossel de aproximadamente 10 m, circundado por plantações de eucalipto, citrus e cana-de-açúcar (ROCHA et al., 2002). Já a torre do plantio de cana-de-açúcar localiza-se na Fazenda São José do Pulador, Usina Santa Rita (21° 38' S; 47° 47' W; 552 m), em área com 351 ha no município de Luiz Antônio, SP. O talhão foi cultivado com cana-de-açúcar, variedade SP83-2847, com espaçamento entre linhas de 1,5 m e com altura média de 3,5 m por ocasião das colheitas, realizadas em 14 de abril de 2005 e 10 de maio de 2006 (segundo e terceiro cortes, respectivamente) (GOMES, 2009).

Na Tabela 1 estão relacionadas as variáveis e/ou elementos meteorológicos, com os respectivos instrumentos utilizados em cada torre, bem como a altura de cada instrumento. A instrumentação utilizada nas duas torres micrometeorológicas instaladas em cada sítio, inclui medições automáticas de diferentes elementos do tempo e clima, que possibilitaram a determinação do balanço radiativo e dos fluxos energéticos e de massa (CO₂ e vapor d'água).

Tabela 1: Sensores das torres micrometeorológicas para o Cerrado e área com cana-de-açúcar.

Variável	Símbolo	Sensor cana de açúcar	Sensor Cerrado	Posição vertical (altura) (m) Cerrado	Posição vertical (altura) (m) cana de açúcar
Temperatura do ar	Ta (°C)	Psicrômetro CSI HMP45C	Psicrômetro CSI HMP45C	21	8,5
Umidade Relativa	UR (%)	Psicrômetro CSI HMP45C	Psicrômetro CSI HMP45C	21	8,5
Precipitação	Prec (mm)	Pluviômetro Hydrological Services	Pluviômetro Hydrological Services	21	8,5
Velocidade do Vento	U (m.s ⁻¹)	Anemômetro RM Young	Anemômetro RM Young	21	8,5
Direção do vento	Dir (°)	Anemômetro RM Young	Anemômetro RM Young	21	8,5
Pressão Atmosférica	Patm (hPa)	Barômetro Vaisala PTB101B	Barômetro Vaisala PTB101B	21	1
Irradiância solar global incidente e refletida	Ki e Kr (W.m ⁻²)	Piranômetro Licor 200X	Piranômetro Licor 200X	21	8,5
PAR incidente e refletida	PARi e PARr (Wm ⁻²)	Licor Quantum LI 190	PAR LITE Kipp&Zonen	21	8,5
Saldo de radiação	Rn (W m ⁻²)	Saldo-Radiômetro REBS	Saldo-Radiômetro REBS	21	8,5
Fluxo de calor no Solo	G (W m ⁻²)	REBS HFT3	REBS HFT3	-0,02	-0,02
*Fluxo de calor Latente	LE (W m ⁻²)	Sistema de Eddy Covariance	Sistema de Eddy Covariance	21	10,5
*Fluxo de calor Sensível	H (W m ⁻²)	Sistema de Eddy Covariance	Sistema de Eddy Covariance	21	10,5
*Fluxo de CO ₂ do ar	FC (µmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	Sistema de Eddy Covariance	Sistema de Eddy Covariance	21	10,5

* Esses parâmetros não são medidos diretamente na torre, são derivados de medidas tridimensionais do vento e dos fluxos verticais de vapor de água (Gomes, 2009). O Sistema de Eddy Covariance coleta medidas de velocidade do vento e temperatura (anemômetro sônico Gill R2-A) umidade e CO₂ (IRGA LiCor Li-6262).

3.3 Imagens Landsat 5

Foram utilizadas imagens TM (Thematic Mapper) a bordo do satélite Landsat 5 para o cômputo das componentes do balanço de radiação e de energia, necessários para determinação da GPP. Estas imagens foram adquiridas junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em sua plataforma DGI (Divisão de Geração de Imagens). Foram selecionadas 10 imagens com céu claro no instante da passagem do satélite, para o ano de 2005, referentes à órbita 220 e ponto 75, cujos dados das imagens TM constam na Tabela 2.

Tabela 2: Imagens selecionadas do Landsat 5 para Santa Rita do Passa Quatro - SP, para o ano de 2005. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do sol (E); distância relativa terra-sol (dr); ângulo zenital solar (Cos Z).

Data	DOA	Hora do satélite	E (°)	dr	Cos Z
22/02/2005	53	12:56:48	53.2956	1.0202	0.8017
10/03/2005	69	12:57:02	51.3178	1.0123	0.7807
11/04/2005	101	12:57:14	45.7733	0.9945	0.7166
13/05/2005	133	12:57:25	39.2289	0.9783	0.6324
29/05/2005	149	12:57:34	36.5641	0.9723	0.5957
14/06/2005	165	12:57:41	34.8639	0.9685	0.5716
16/07/2005	197	12:57:53	35.492	0.9680	0.5806
01/08/2005	213	12:58:04	37.9903	0.9714	0.6155
17/08/2005	229	12:58:11	41.7257	0.9770	0.6656
21/11/2005	325	12:58:40	62.8771	1.0255	0.8900

3.4 Imagens Landsat 8

Foram utilizadas imagens OLI/TIRS - Landsat 8 para cômputo das componentes dos balanços de radiação e energia, necessários para determinação da GPP no ano de 2015. Estas imagens foram adquiridas junto ao USGS (*United States Geological Survey*) em sua plataforma *Earth Explorer*. Foram selecionadas 7 imagens com céu claro no instante da passagem do satélite, referentes à órbita 220 e ponto 75, cujos dados extraídos do metadados de cada imagem constam da Tabela 3.

Tabela 3: Imagens selecionadas do Landsat 8 para Santa Rita do Passa Quatro - SP, 2015. Dia de ordem do ano (DOA); ângulo de elevação do Sol (E); distância relativa terra-sol (dr); cosseno do ângulo zenital solar (Cos Z).

Data	DOA	Hora do satélite	E (°)	dr	Cos Z
23/04/2015	113	13:09:28	44.8987	0.9892	0.7059
09/05/2015	129	13:09:13	41.4282	0.9813	0.6617
25/05/2015	145	13:09:12	38.4815	0.9748	0.6223
10/06/2015	161	13:09:23	36.4956	0.9702	0.5948
26/06/2015	177	13:09:28	35.7735	0.9678	0.5846
28/07/2015	209	13:09:45	38.7549	0.9699	0.6260
16/10/2015	289	13:10:09	61.4355	1.0061	0.8783

3.5 Imagens Modis - Produtos MOD17A2H

O produto MOD17A2H foi adquirido para validação dos dados de GPP para a área de estudo. Este produto é derivado do sensor MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. O MOD17A2H fornece dados de GPP ($\text{kg C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) com base no conceito da eficiência do uso da luz de Monteith (1972) relacionando a fotossíntese bruta à quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) absorvida pela vegetação (HEINSCH et al., 2006). Embora esse produto esteja disponível para diversos ecossistemas terrestres, o mesmo apresenta algumas desvantagens, como a resolução espacial de 500 m. Por sua vez, a PAR é estimada com

base em dados de radiação solar global extraídos de dados de re-análises, além de ser um produto acumulado de 8 dias, podendo causar alguma incompatibilidade.

As imagens MODIS foram adquiridas da NASA *Earth Science Data and Information System* (ESDIS) disponíveis no endereço: https://lpdaac.usgs.gov/tools/data_access/daac2disk_web. Foram efetuados recortes do produto MOD17A2H de acordo com área de estudo. Depois de efetuado o recorte realizou-se a correção da camada com a GPP. Essa correção compreende a multiplicação de cada pixel da camada GPP pelo fator 0,0001 e divisão por 8, o que resulta nos valores de GPP em $\text{kg C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Foram selecionadas as imagens de forma que incluísse os dias selecionados para as imagens Landsat.

3.6 Estimativa da Produtividade Primária Bruta

3.6.1 GPP por Eddy Covariance

Através do método da Eddy Covariance foi estimado o fluxo de carbono entre o ecossistema e a atmosfera (NEE), que foi então particionada em GPP e Re. A GPP foi estimada através da seguinte equação:

$$GPP = NEE + Re \quad (4)$$

onde: Re representa a respiração do ecossistema.

Para o período noturno, como não ocorre assimilação de CO_2 pela vegetação, pode-se assumir que a GPP é nula, logo, tem-se:

$$NEE = Re \quad (5)$$

A Re diária foi obtida por meio da integração de dados de NEE noturno de meia em meia hora.

3.6.2 GPP por Imagens Landsat

Utilizou-se a ferramenta Model Maker do software Erdas versão 9.1, segundo o fluxograma abaixo (Figura 7). Realizou-se um pré-processamento das imagens envolvendo o empilhamento das 6 camadas (1 a 7) do sensor TM do Landsat 5 e (2 a 7 e 10) dos sensores OLI/TIRS. Logo após realizou-se o corte da área de estudo.

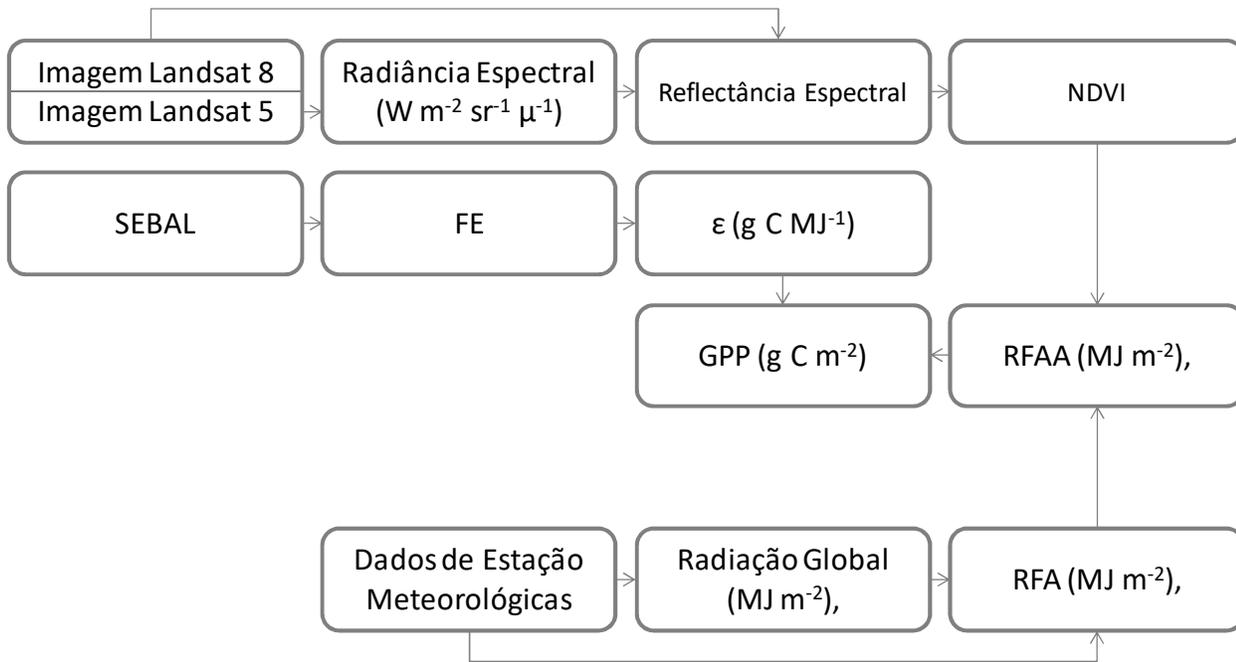


Figura 7: Fluxograma do processo de obtenção da GPP por imagens Landsat 5 e 8.

- **GPP**

A Produtividade Primária Bruta (GPP), em $g\ C\ m^{-2}$, foi obtida com base no modelo proposto por Monteith (1972) e Hilkeret et al. (2008), qual seja:

$$GPP = RFAA \times \varepsilon \quad (6)$$

onde:

RFAA ($W\ m^{-2}$) é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação;

ε ($g\ C\ MJ^{-1}$) é a eficiência do uso da luz;

- **Cômputo da radiação fotossinteticamente ativa absorvida – RFAA**

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, pode ser obtida em função da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR) e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI, proposta por Daughtry et al. (1995) e que tem sido usada em outros estudos (RUNNING et al., 2004; BASTIAANSSEN e ALI, 2003):

$$RFAA = PAR (-0,161 + 1,257 NDVI) \quad (7)$$

em que PAR ($W m^{-2}$) corresponde a uma fração da radiação solar incidente e que se situa entre 400 e 700 nm, dada em $MJ m^{-2} dia^{-1}$. Na ausência de suas medições a mesma pode ser estimada em função da radiação solar global diária (Rg), segundo a seguinte proposta por Bastiaanssen e Ali (2003):

$$PAR = 0.48 x Rg \quad (8)$$

- **Determinação da eficiência do uso da luz**

A eficiência do uso da luz pode ser obtida de acordo com equação proposta por Field et al. (1995), posteriormente modificada por Bastiaanssen e Ali (2003):

$$\varepsilon = \varepsilon' . T_1 . T_2 . FE \quad (9)$$

em que: ε' representa a eficiência máxima de uso da luz pela vegetação (considerada na pesquisa igual a $2,15 g C MJ^{-1}$) (SILVA et al., 2013); FE é a fração evaporativa, que reflete a contribuição do fator umidade na fotossíntese; e T_1 e T_2 são parâmetros relacionados à temperatura e refletem a influência desses na eficiência fotossintética da vegetação, que são computados por:

$$T_1 = 0,8 + 0,02 T_{opt} - 0,0005 T_{opt}^2 \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2 T_{opt} - 10 - T_{dia})} \cdot \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{dia})]} \quad (11)$$

em que T_{opt} é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$) do mês de máximo NDVI e T_{dia} é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$) do dia em que se determina a GPP.

A FE pode ser determinada com base no balanço de energia segundo o SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998; SILVA e BEZERRA, 2006; ALLEN et al., 2007; BEZERRA et al., 2008, 2010). Pelo SEBAL estima-se a densidade do fluxo de calor latente LE ($W\ m^{-2}$) em função do balanço de energia, segundo a seguinte expressão:

$$LE = Rn - G - H \quad (12)$$

em que: Rn ($W\ m^{-2}$) é o saldo de radiação; G ($W\ m^{-2}$) é a densidade de fluxo de calor no solo; e H ($W\ m^{-2}$) é a densidade de fluxo de calor sensível.

Os valores da fração evaporativa – FE foram obtidos com base nos valores instantâneos de Rn , G e LE , segundo a equação:

$$FE = \frac{LE}{(Rn - G)} \quad (13)$$

Detalhes dos balanços de radiação e de energia podem ser obtidos em Allen et al. (2007), Bezerra et al. (2010) e Silva et al. (2011).

3.6.3 Análise Estatística

Os valores de GPP estimado por imagem do Landsat 5, Landsat 8 e com o produto MOD17A2H foram comparados aos dados micrometeorológicos (EC) por meio dos seguintes erros: Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Médio Percentual (EMP) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), dadas pelas seguintes equações:

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{est} - X_{obs}| \quad (14)$$

$$EMP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{est} - X_{obs}}{X_{obs}} \right| \quad (15)$$

$$REQM = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{est} - X_{obs})^2}{N} \right)} \quad (16)$$

Onde: X_{est} e X_{obs} correspondem a valores estimados e observados, respectivamente, e N é a quantidade de pares de valores investigados.

4 Resultados e Discussão

4.1 Dados meteorológicos

Observa-se na Figura 8 a variação mensal da temperatura, radiação fotossinteticamente ativa e umidade relativa do ar. Como se observa, o comportamento dessas variáveis foi similar tanto para a área de cana-de-açúcar quanto para o cerrado, no período de fevereiro de 2005 a janeiro de 2006 e estes foram também similares ao ano 2015. As temperaturas médias são em geral inferiores a 21° C entre maio e agosto, e superiores a 23° C nos outros meses (Figura 8 a). A umidade relativa teve seus menores valores próximo a 50% no mês de agosto, e superiores a 70% em março e dezembro (Figura 8 c). A PAR teve comportamento similar ao da temperatura ao longo do ano, sendo que os menores valores foram registrados entre maio e julho e os maiores valores nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro (Figura 8 b). O total de precipitação mensal é apresentado na Figura 9, sendo os meses que têm a menor precipitação estão entre abril a agosto para os dois períodos, sendo que essas representam 13% e 9% do total para 2005-2006 e 2015, respectivamente. As precipitações anuais foram de 1181 mm e 1304 mm para os períodos entre fevereiro de 2005 a janeiro de 2006, e janeiro a dezembro de 2015, respectivamente. Estes dois períodos tiveram precipitação abaixo da média dessa região, sendo 21 e 12% inferiores à essa, respectivamente, para os períodos 2005-2006 e 2015.

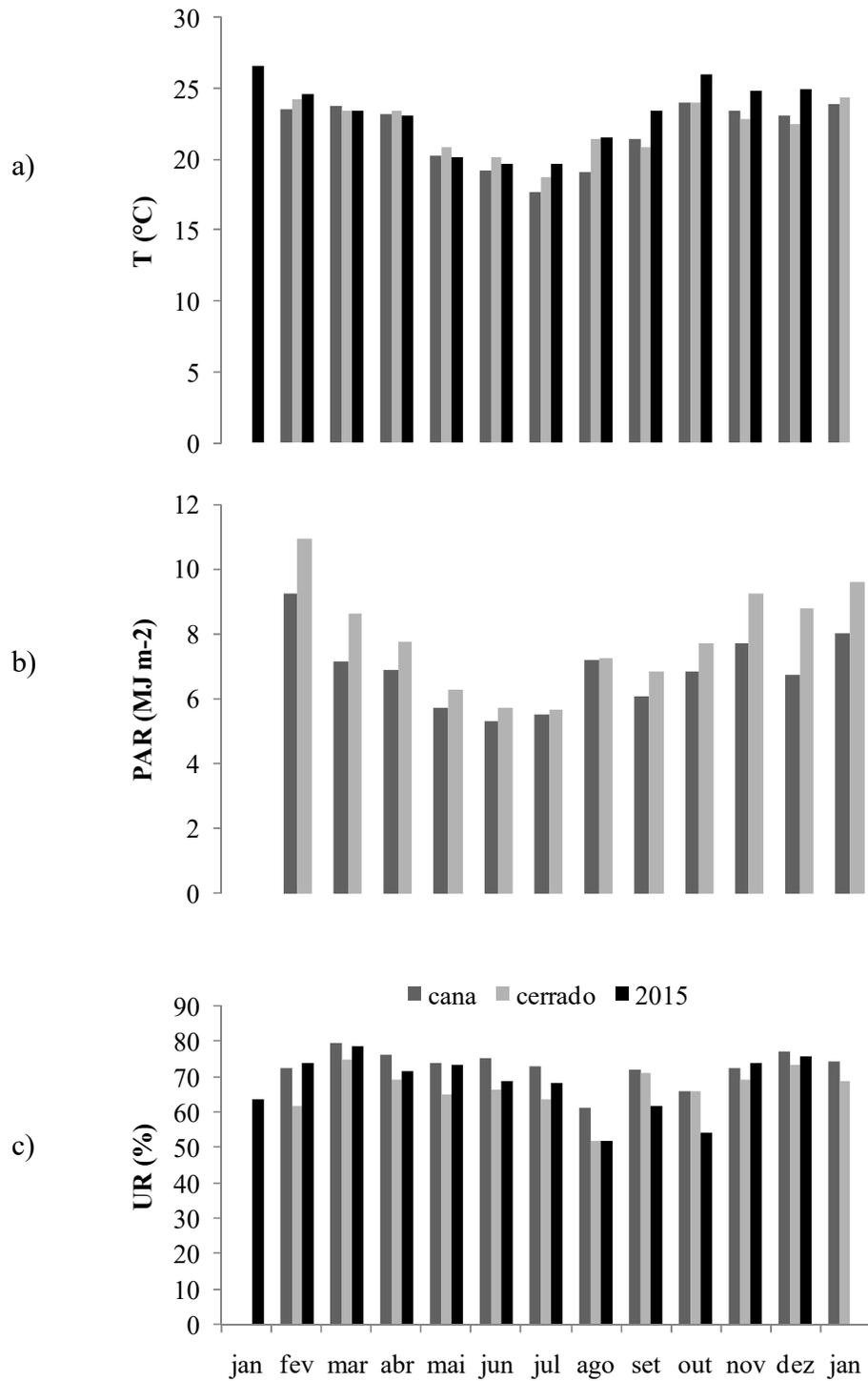


Figura 8: Médias mensais das variáveis meteorológicas, temperatura do ar (T) (a), radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (b) e umidade relativa do ar (UR) (c), para Santa Rita do Passa Quatro – SP, linhas cinzas (fevereiro 2005 a janeiro 2006) e linha preta (2015)

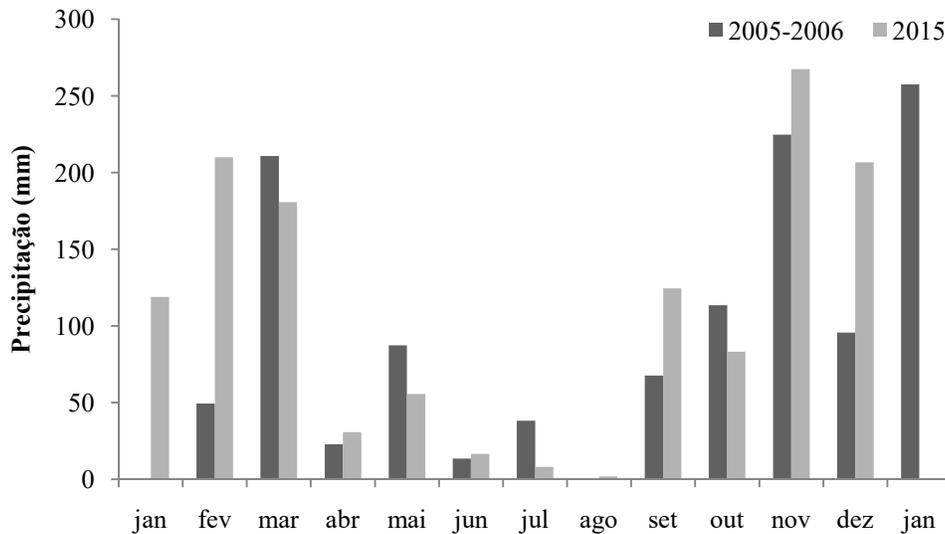


Figura 9 - Precipitação total mensal para o período fevereiro 2005 a janeiro 2006 e para o ano de 2015

4.2 Influência das condições meteorológicas no balanço de energia

A média mensal diária para o período de fevereiro de 2005 a janeiro de 2006, ou variação sazonal dos fluxos do saldo de radiação (R_n), nas áreas de cana-de-açúcar e cerrado estão representados na Figura 10 a. O comportamento do R_n foi semelhante tanto para o cerrado quanto para a cana-de-açúcar, sendo os maiores valores próximos de 700 W m^{-2} , nos meses de fevereiro e janeiro, resultados similares aos obtidos por Rodda et al. (2016). Os menores valores ocorreram entre maio e julho, que coincidem com os meses com menores temperaturas, radiação e precipitação.

Os valores do fluxo de calor latente (LE) são mais elevados nos meses onde há maior precipitação e temperatura, aumentando assim o processo evapotranspirativo (Figura 10 d). Observa-se que durante a estação seca há uma diminuição acentuada do LE, tanto para a cana-de-açúcar quanto para o cerrado, o que já era esperado, vez que nessas áreas se pratica a agricultura de sequeiro. Já o fluxo de calor sensível (H) registrou um pico em agosto, chegando a 282 W m^{-2} e 210 W m^{-2} , para cerrado e cana-de-açúcar, respectivamente (Figura 10 c). Esse mês se caracterizou por não haver precipitação e por apresentar umidade relativa baixa, contribuindo assim para o aumento de H e diminuição de LE, para as duas áreas de estudo. Porém, para a cana-de-açúcar o H foi superior ao LE de maio a setembro, enquanto que para o cerrado apenas

em agosto e setembro. No mês de agosto o fluxo de calor no solo (G) foi máximo, chegando a 229 W m^{-2} na cana-de-açúcar, valor que chegou a ser superiores -ao do LE (159 W m^{-2}) (Figura 10 b). Já durante os outros meses da estação seca esses também foram superiores, indicando que o armazenamento de calor no solo é uma importante componente do balanço de energia (OLIVEIRA et al., 2006). Já para o cerrado os valores de G foram sempre inferiores aos de LE.

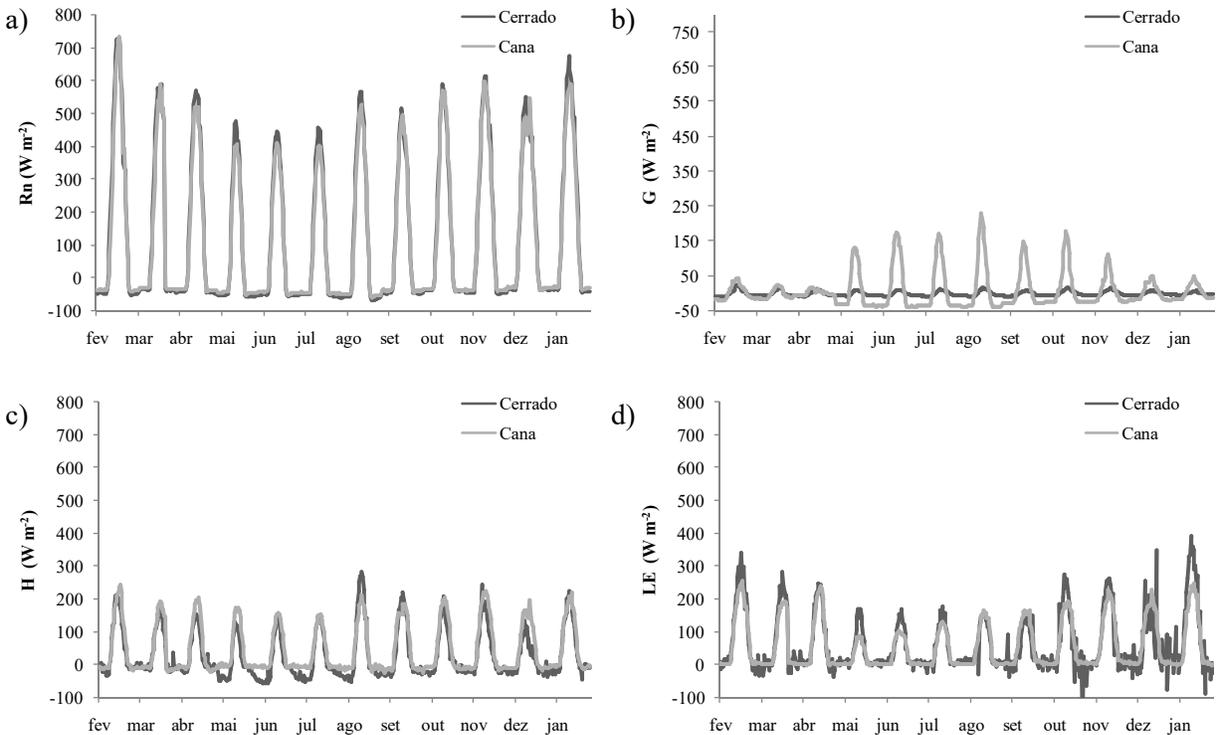


Figura 10: Fluxos de energia (W m^{-2}) para o período de fevereiro de 2005 a janeiro de 2006: saldo de radiação (R_n) (a), fluxo de calor no solo (G) (b), fluxo de calor sensível (H) (c) e fluxo de calor latente (LE) (d).

4.3 Balanço de Energia

Na Figura 11 representa-se uma comparação entre os fluxos turbulentos de H e LE com a energia disponível (Rn-G) para cana-de-açúcar e cerrado, para o período fevereiro de 2005 a janeiro de 2006. Tanto para a cana-de-açúcar, quanto para o cerrado, fica evidenciado não haver fechamento do balanço de energia, sendo que os fluxos (H+LE) representam 80% e 67% da (Rn-G), ou seja, os fluxos turbulentos são até 20% e 33% menores que (Rn-G), para cana-de-açúcar e cerrado, respectivamente. Esses resultados são corroborados com inúmeros estudos em diferentes biomas e também em cultivos agrícolas (ROCHA et al., 2004; VEENENDAAL et al., 2004; BORGES et al., 2016); diante do grande número de dados avaliados, permite-se uma avaliação positiva da qualidade dos dados de fluxos obtidos. Frequentemente, erros no fechamento entre 10 e 30% têm sido relatados na literatura. Borges et al. (2016) realizaram um trabalho para analisar o fechamento do balanço de energia pelo método EC em áreas de caatinga preservada e degradada no Nordeste brasileiro e encontraram diferenças de 23 e 38% entre (Rn - G) e (H + LE). Rodda et al. (2016), por sua vez, encontraram que (H+LE) representa 78% de (Rn - G), em uma região de mangue na Índia, utilizando o EC. Souza (2014a) obteve uma diferença de 25% entre esses mesmos fluxos, para o município de Petrolina – PE, também obtidos com a técnica de EC. Segundo Irmak et al. (2014), o problema do desequilíbrio no balanço de energia surge por conta da contribuição dos fluxos turbulentos (LE + H) serem menor que a energia disponível (Rn - G), de forma que os fluxos turbulentos são subestimados. Existem algumas causas para isso, dentre elas estão a imprecisão nas medições, devido principalmente ao problema de escalas, em não se contabilizar o calor armazenado no solo e no dossel das plantas e a formação de turbilhões maiores, devido heterogeneidade da superfície (FOKEN et al., 2006; IRMAK et al., 2014).

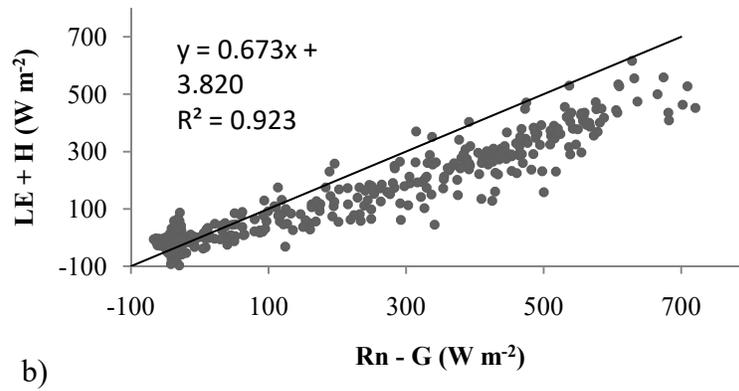
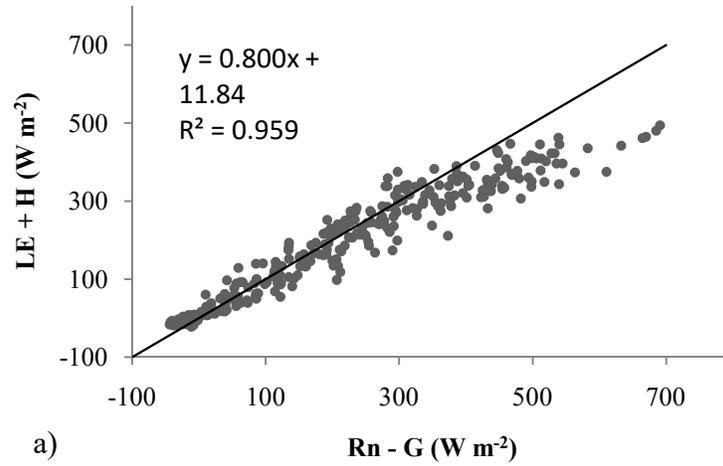


Figura 11: Energia disponível ($Rn - G$) e os fluxos turbulentos ($LE + H$) para o fechamento do balanço de energia (BE): a) em cana-de-açúcar, b) em cerrado

4.4 Produtividade Primária Bruta (GPP)

Os resultados de GPP observada (EC), estimada com dados TM e OLI - Landsat 5 e 8, respectivamente, e com o MOD17A2H estão dispostos na Tabela 4. Os valores medidos diferem naturalmente das estimativas visto que as escalas de captação são diferentes. Para o ano de 2005, no cultivo de cana-de-açúcar e no cerrado, a GPP medida (EC) e estimadas pelo Landsat 5 e pelo MOD17A2H, tiveram comportamentos semelhantes, entre os dias 133 a 229 e 149 a 229, respectivamente, sendo que esses valores foram inferiores em relação às outras datas, que correspondem ao período de menor precipitação, temperatura e PAR. Esses resultados são semelhantes aos de outros estudos que indicam haver maior absorção de carbono no período chuvoso (SANTOS, 2015; SOUZA et al., 2014). Já para os dias do ano de 2015, o comportamento da GPP é similar para os dados obtidos entre o Landsat e MOD17A2H, com valores mais elevados durante a estação chuvosa. Já para a GPP medida pelo método EC, o menor valor foi obtido no dia 209, que coincidiu com um dos meses com precipitação inferior a 10 mm.

Comparando-se o cerrado com a cana-de-açúcar para o período de 2005-2006, os valores de GPP estimados através do TM - Landsat e do MOD17A2H foram superiores para o cerrado. Já para o método EC, a GPP foi superior na cana-de-açúcar nos dias 53 e 229. No ano de 2015 os dados obtidos pelo Landsat 8 e também com o MOD17A2H se mostraram sistematicamente superiores aos do EC.

Os valores do MOD17A2H oscilaram bem menos que os gerados pelas outras técnicas, tanto para a cana-de-açúcar quanto para o cerrado. É possível que a composição de 8 dias, empregada no MOD17A2H, possa reduzir a grande variabilidade causada pelas oscilações na nebulosidade. Os valores de GPP para o Landsat foram sistematicamente superiores ao do produto MODIS para o cerrado. Uma possível explicação poderia estar nos valores da eficiência máxima da luz utilizada para o Landsat, que neste estudo também foi de $2,15 \text{ g C MJ}^{-1}$, como adotado por SILVA et al. (2013), enquanto que no produto MOD17A2H esse valor é de $1,239 \text{ g C MJ}^{-1}$ (RUNNING et al., 2015). Já para a cana-de-açúcar os valores estimados com o TM - Landsat foram superiores apenas para o período com maior precipitação.

Na Tabela 5 estão representados os valores de EMA, EMP e REQM associados com a GPP (g C m^{-2}) obtidos com imagens Landsat e com o MOD17A2H, comparados com os dados da torre micrometeorológica obtido pelo método de EC, para o cerrado e cana-de-açúcar. O

método que apresentou maior concordância com os dados das torres foi o que se utilizou dos dados do Landsat para a cana-de-açúcar, o que resultou em valores de EAM de 2,26 g C m⁻², EMP de 38,95% e REQM de 2,74 g C m⁻². Em área de perímetro irrigado no Semiárido brasileiro, Silva et al. (2013) empregaram essas mesmas métricas estatísticas ao avaliar a GPP obtida com imagens Landsat 5 e também dados do MD17A2. Os valores dos erros obtidos naquela pesquisa foram de EAM de 0,91 g C m⁻² dia⁻¹, EMP de 11,82% e REQM de 1,12 g C m⁻² dia⁻¹.

Tabela 4 – Dados diário da produtividade primária bruta (g C m⁻²) para Cerrado e cana-de-açúcar, com TM - Landsat 5, OLI – Landsat 8, MOD17A2H e Eddy Covariance (EC)

Data	DOA	Cerrado			Cana-de-açúcar		
		GPP (g C m ⁻²)					
		MOD17A2H	Landsat	EC	MOD17A2H	Landsat	EC
22/02/2005	53	10.475	15.891	7.082	7.813	14.877	13.531
10/03/2005	69	8.613	8.903	17.795	6.300	8.256	10.966
11/04/2005	101	8.863	12.262	7.292	6.575	11.707	
13/05/2005	133	6.488	8.424	9.082	2.138	0.855	3.652
29/05/2005	149	6.463	7.936	5.662	2.425	1.370	1.765
14/06/2005	165	6.463	7.031	5.093	2.513	1.891	2.667
16/07/2005	197	6.538	6.364	3.030	3.363	2.222	5.236
01/08/2005	213	6.275	6.855	3.322	3.988	2.978	6.117
17/08/2005	229	5.638	6.815	2.832	3.100	1.947	7.462
21/11/2005	325	8.038	16.339	8.192	4.625	12.789	12.172
23/04/2015	113	8.813	11.939	7.148			
09/05/2015	129	6.938	11.509	6.456			
25/05/2015	145	6.563	10.206	4.961			
10/06/2015	161	6.475	9.178	3.904			
26/06/2015	177	6.375	8.835	6.018			
28/07/2015	209	6.113	8.337	1.219			
16/10/2015	289	2.050	7.340	3.176			

DOA: dia de ordem do ano; GPP: produtividade primária bruta; EC: eddy covariance.

Tabela 5 - Erro médio absoluto (EMA) (g C m^{-2}), erro médio percentual (EMP) (%) e raiz do erro quadrático médio (REQM) (g C m^{-2}) associado com GPP obtido por landsat e pelo MOD17A2H, para cana-de-açúcar e cerrado

Satélites	EMA (g C m^{-2})	EMP (%)	REQM (g C m^{-2})
Landsat cerrado	4.76	113.67	5.29
Landsat cana-de-açúcar	2.26	38.95	2.74
MOD17A2H cerrado	2.41	62.82	3.20
MOD17A2H cana-de-açúcar	3.18	40.06	3.96

De acordo com a Figura 12, observa-se que a maioria dos valores de GPP estimados por satélite, para o Cerrado superestima os valores da torre, tanto para 2005-2006 quanto para 2015. Já para a cana-de-açúcar acontece o contrário, a maioria dos valores de satélites subestima os valores da torre. Para o cerrado os coeficientes de determinação R^2 , para 2005-2006 e 2015, respectivamente, foram de 0,503 e 0,568 para MOD17A2H e 0,274 e 0,782 para o landsat. Para a cana-de-açúcar os coeficientes R^2 foram de 0,894 e 0,923 para MOD17A2H e Landsat, respectivamente. Os valores do R^2 do MOD17A2H para o cerrado foram inferiores aos de Santos (2015), em estudo com o produto MOD17 em comparação com o EC em áreas de Caatinga em recuperação (CREC) e degradada (CDEG) no estado da Paraíba, em que os valores foram 0,74 e 0,66, respectivamente. Já os do Landsat foram inferiores aos de Madugundu et al. (2017), para o cerrado, porém, semelhantes para a cana-de-açúcar. Estes coeficientes sugerem que o Landsat teve maior eficiência para a simulação da GPP para a cana-de-açúcar.

As Figuras 13 e 14 apresentam mapas temáticos das imagens processadas com o Landsat referentes aos cálculos GPP, o que evidencia a relação da GPP com o teor de umidade do solo. Depreende-se que a chuva é um fator limitante para a absorção de carbono pela vegetação, uma vez que nos meses com baixa precipitação, os valores de GPP são menores. No entanto, não se

deve deixar de considerar que a sazonalidade da radiação solar também é outro fator que impacta bastante a GPP.

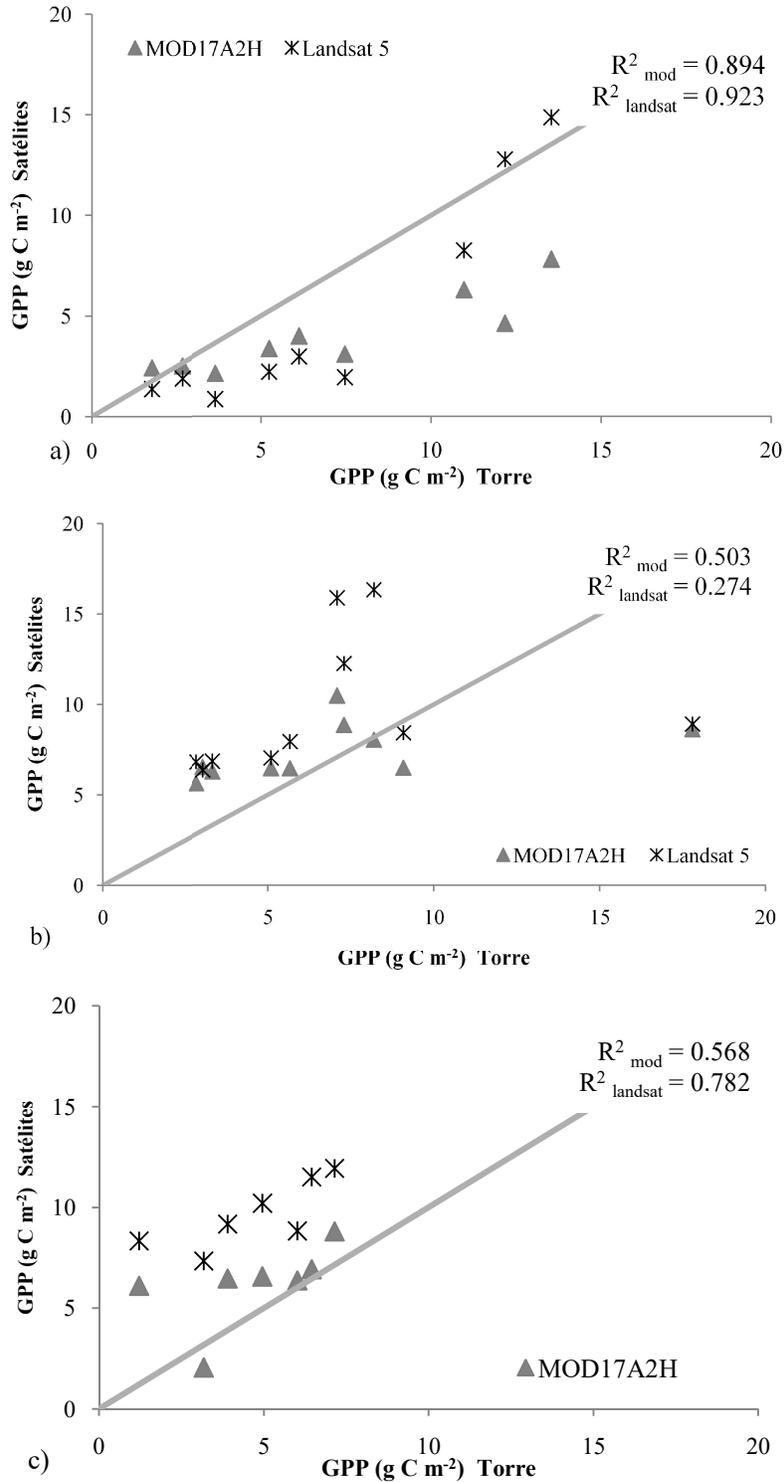


Figura 12: Comparação dos dados do Landsat 5 e 8, MOD17A2H e Torre, para 2005 e 2015, sendo a) cana-de-açúcar_2005, b) área de cerrado_2005 e c) cerrado_2015

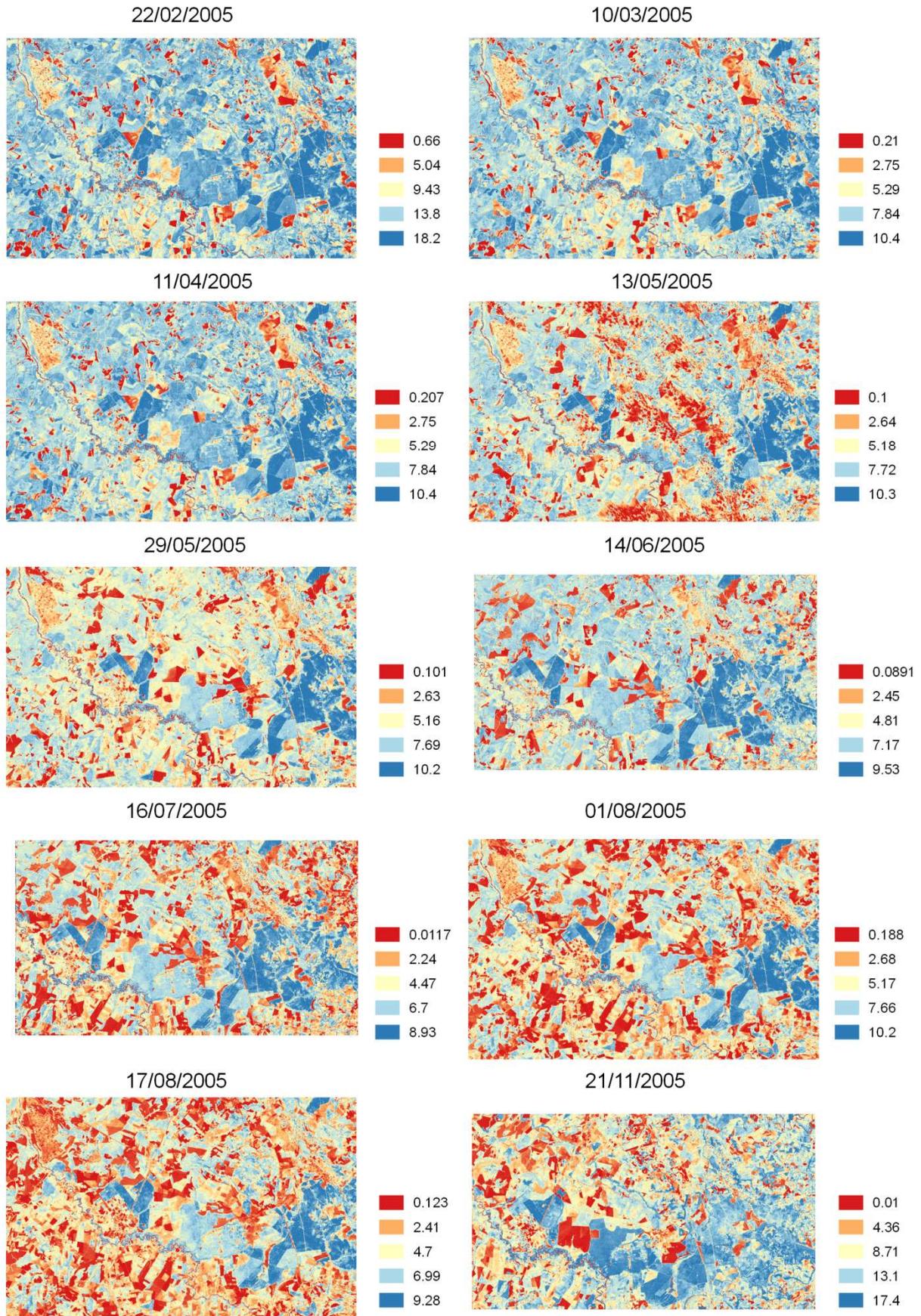


Figura 13: GPP diário (g C m^{-2}), com imagens TM no ano de 2005. (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

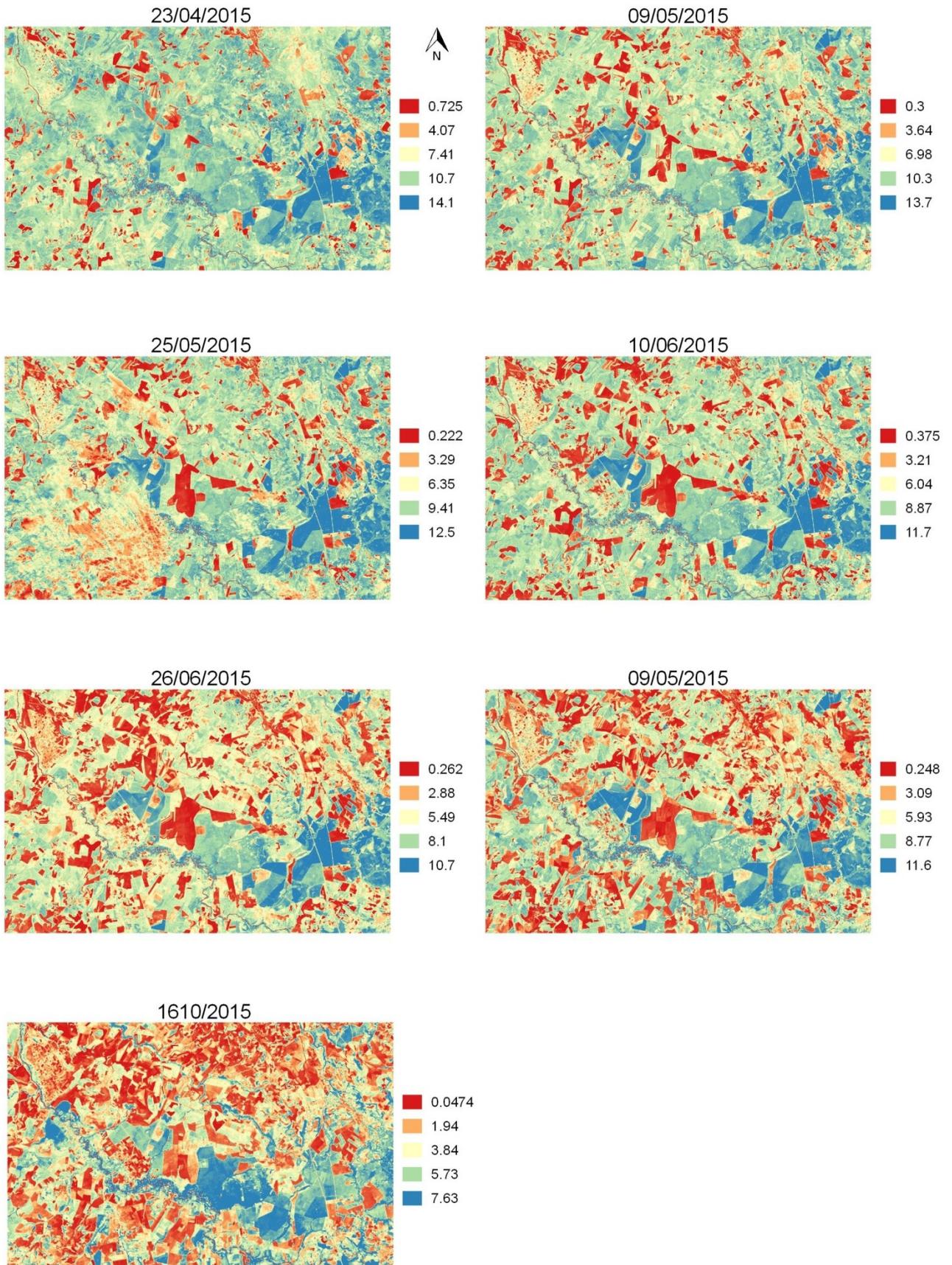


Figura 14: GPP (g C m^{-2}), com imagens OLI-TIRS no ano de 2015. (Projeção: geográfica, Datum: WGS 84).

4.5 Análise da Troca Líquida de CO₂ (NEE)

Os dados de NEE obtidos pelo método EC foram extraídos pela média mensal para cada intervalo de meia hora (Figura 15). De uma forma geral, a NEE apresentou um comportamento típico, durante a noite, quando as emissões do solo e a respiração combinam-se como uma fonte de CO₂ para a atmosfera e decresce logo após o amanhecer quando o CO₂ atmosférico é absorvido pela vegetação e as reações fotoquímicas começam a ocorrer de maneira mais intensa, sendo que entre 8 e 16 h é o período de maior absorção de CO₂ nos dois sítios experimentais.

Observa-se na Figura 16 as variações mensais do fluxo médio de carbono durante o ano (fevereiro de 2005 a fevereiro de 2006) para as duas áreas de estudo. Para a área com cana-de-açúcar as variações sazonais foram maiores do que na área com vegetação nativa de cerrado. Durante os meses de maio a julho os valores do NEE diurno foram menores que nos outros meses, e estes foram em média de $-3,5206 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, já para os meses de fevereiro a abril estes valores foram em média de $-9,7712 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Percebe-se uma sazonalidade na absorção do CO₂, que parece responder ao efeito da precipitação (Figura 9) e do fluxo de calor latente (Figura 10), nas duas áreas de estudo. Por exemplo, os meses de fevereiro a abril e novembro a janeiro apresentam um alto percentual de absorção, como resposta ao alto volume de chuva do mês anterior. No entanto, essa sazonalidade foi mais intensa para a área com cana-de-açúcar. Isso acontece porque em 2005 se completou um ciclo da cana-de-açúcar e esta absorveu mais carbono nas suas fases de crescimento e maturidade, onde se estabiliza essa absorção (CABRAL et al., 2013).

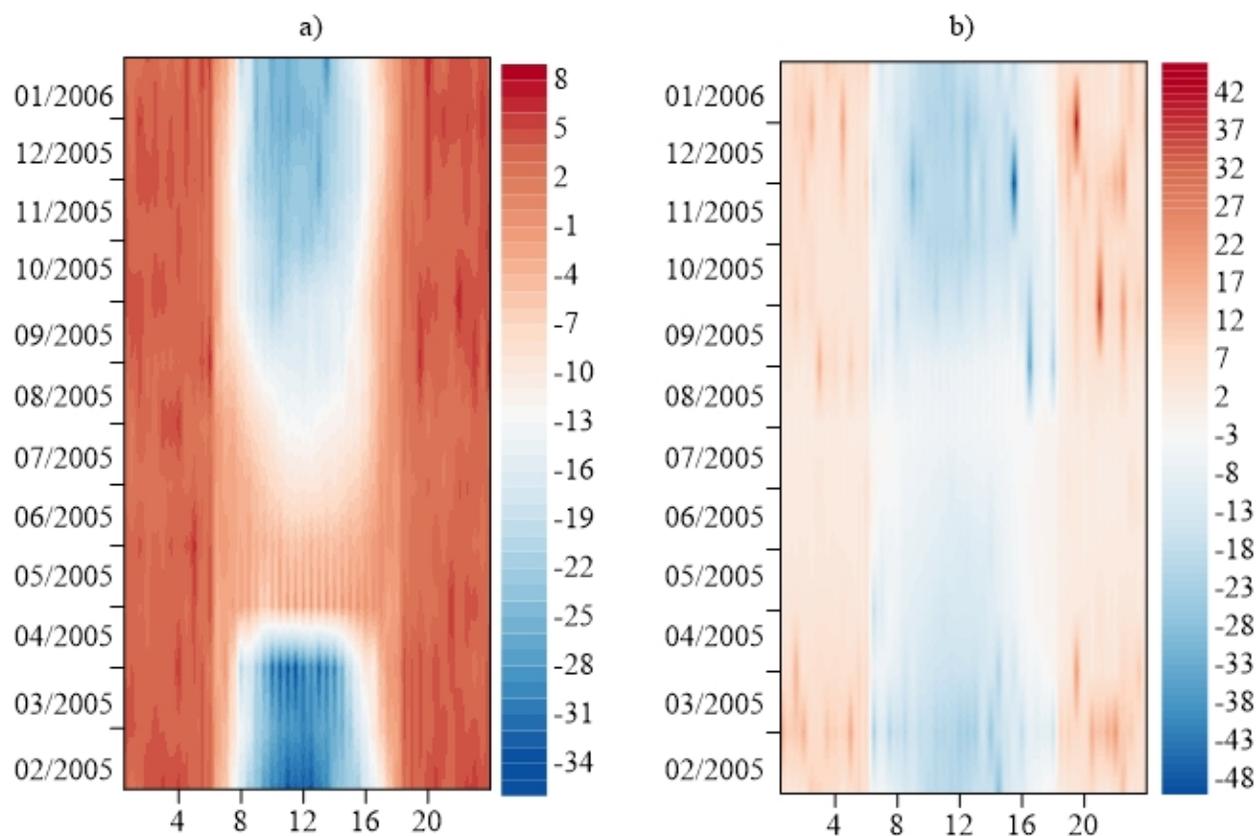


Figura 15: Troca líquida de CO₂ - NEE médio mensal ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) para: a) cana-de-açúcar; e b) cerrado, hora do dia (eixo x), mês do ano (eixo y).

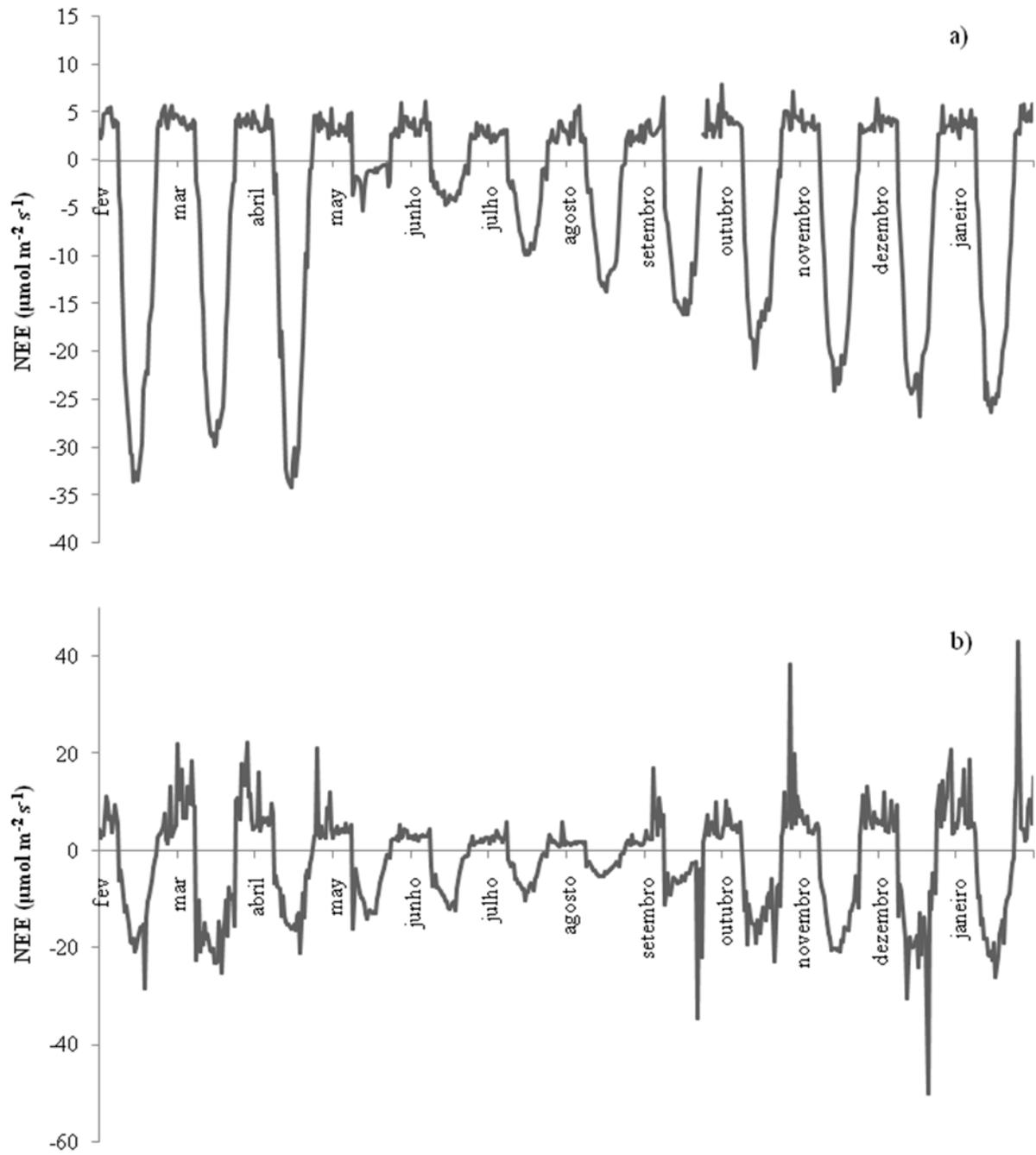


Figura 16 - Média mensal das variações de CO_2 - NEE ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) para: a) cana-de-açúcar; e b) cerrado, de fevereiro de 2005 a janeiro de 2006.

4.6 Processo de absorção e liberação de CO₂

Na Figura 17 observa-se que durante todo o ano o cerrado comporta-se como sumidouro de carbono. Este bioma sequestrou 2069 g C m⁻² e emitiu 1125 g C m⁻², mesmo sendo um ano com precipitação abaixo da média. Este bioma se mostrou um eficiente absorvedor de carbono, indicando que sua proteção é de suma importância para reduzir emissões de dióxido de carbono.

O cultivo de cana-de-açúcar se comportou como sumidouro durante quase todo o ano, sequestrando 2354 g C m⁻² e emitindo 696 g C m⁻², porém nos meses de maio e junho este foi fonte de carbono. Apesar da cana-de-açúcar ter sequestrado mais carbono que o cerrado durante o ano, este teve maiores valores de GPP, devido a maiores valores de respiração, sendo esses 3050 e 3194 g C m⁻², valores semelhantes aos obtidos por Cabral et al., (2011) e (2013).

Para as duas áreas o sequestro de carbono respondeu à precipitação; no entanto, para a área da usina de cana-de-açúcar durante os meses de maio e junho ocorreram queima de palha acumulada, aragem do solo, adubação e aplicação de herbicidas, o que, juntamente com a precipitação reduzida desses meses e dos anteriores, resultaram em valores da respiração superiores aos da produtividade primária líquida - NPP, o que pode ser visualizado na Figura 10, onde a cana-de-açúcar apresenta valores superiores de H e G em relação ao LE, ou seja, período em que ocorreu maior acúmulo de calor no solo e menor processo evapotranspirativo.

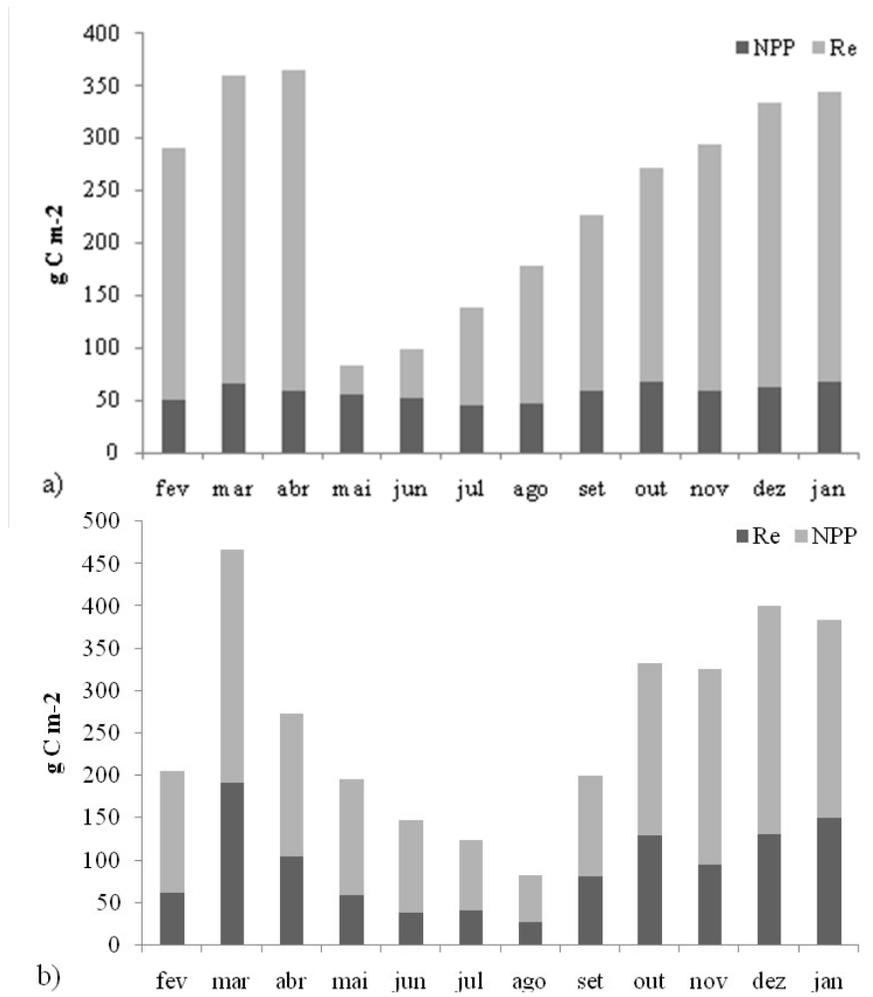


Figura 17: Valor total mensal da produtividade primária líquida - NPP e da respiração - Re para: a) cana-de-açúcar; e b) cerrado.

4.7 Impactos da radiação fotossinteticamente ativa na GPP

A análise dos dados obtidos no período de fevereiro de 2005 à janeiro de 2006 permitiram estabelecer a seguinte relação, conforme a Figura 18, $PAR = 0,3787R_g - 0,143$ com coeficiente de determinação de 0,9776. Desde que o coeficiente linear (0,9776) não difere estatisticamente de zero ao nível de significância de 5%, a relação entre PAR e R_g pode ser representada mais simplesmente por $PAR = 0,3787 R_g$ (para valores de PAR em $MJ m^{-2}$) ou $PAR = 1,742 R_g$ (para valores de PAR em $\mu mol s^{-1} m^{-2}$). A análise de frequência de PAR/ R_g para todo o período analisado, evidenciou que as maiores proporções dos dados ficaram entre 0,37 e 0,38 para a região de estudo. Com base na análise, há uma probabilidade de 85% em que a PAR represente de 36 a 39% da R_g , valores estes inferiores aos encontrados por Alados et al. (1996), Alvalá e Silva (2000) e McCree (1966) mas similares aos de Steidle Neto et al. (2008).

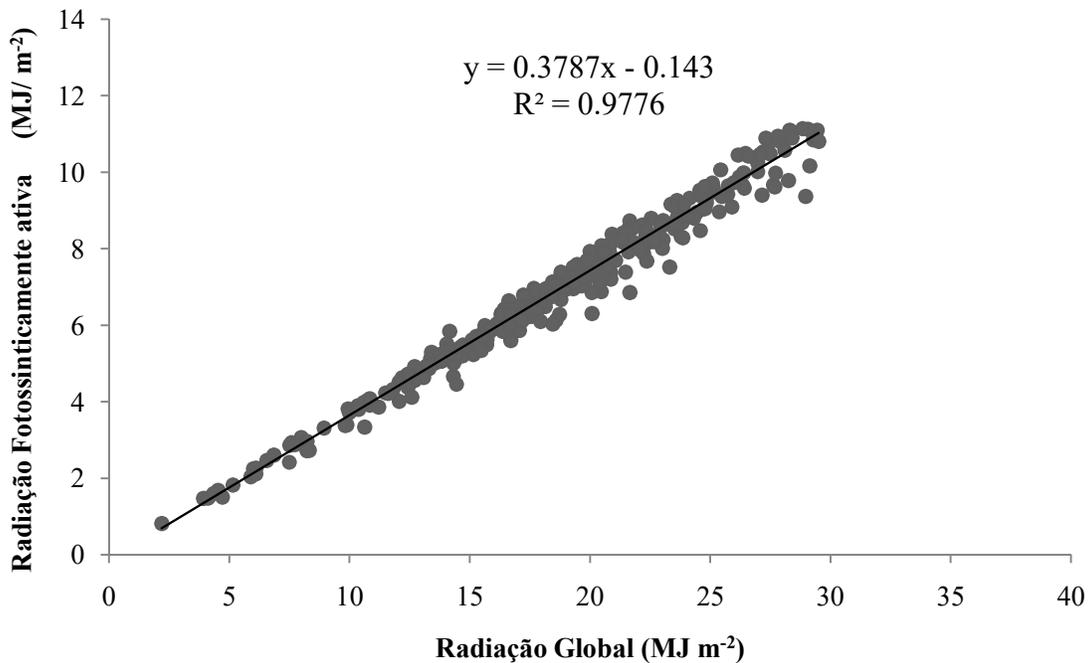


Figura 18: Relação entre radiação fotossinteticamente ativa - PAR e radiação global - R_g com dados medidos no período compreendido entre fevereiro de 2005 a fevereiro de 2006, em Santa Rita do Passa Quatro - SP.

As Tabelas 6 e 7 representam os valores EAM e o EMP associados com os valores de GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), obtidos com dois modelos diferentes de PAR. O modelo que apresentou a melhor estimativa da GPP foi o PAR = 0.3787 Rg, com diferença inferior a 5% em relação aos valores de PAR das torres micrometeorológicas. Já o modelo PAR = 0.48 (MORAN et al., 1995) sugerido na literatura quando não há medições de radiação PAR, superestimou a GPP no período estudado em mais de 20%.

Tabela 6 - Estatísticas comparativas para o desempenho da relação PAR = 0.3787 Rg e PAR = 48 Rg para Santa Rita do Passa Quatro – SP, Cerrado.

Cerrado	Par = 0.38 Rg		Par = 0.48 Rg		
	Datas	EMA ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	EMP (%)	EMA ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)	EMP (%)
	22/02/2005	1.22	7.73	2.67	16.95
	10/03/2005	0.78	8.80	1.38	15.60
	11/04/2005	0.89	7.31	2.12	17.48
	13/05/2005	0.37	4.28	1.83	21.32
	29/05/2005	0.21	2.53	1.91	23.54
	14/06/2005	0.08	1.20	1.76	25.22
	16/07/2005	0.04	0.65	1.66	25.93
	01/08/2005	0.03	0.47	1.83	26.15
	17/08/2005	0.14	2.10	1.64	24.09
	21/11/2005	0.57	3.43	3.69	22.40
	Média	0.43	3.85	2.05	21.87

EMA: erro médio absoluto; EMP: erro médio percentual.

Tabela 7 - Estatísticas comparativas para o desempenho da relação PAR = 0.3787 Rg e PAR = 48 Rg para Santa Rita do Passa Quatro – SP, cana-de-açúcar.

Cana-de-açúcar	Par = 0.38 Rg		Par = 0.48 Rg		
	Datas	EMA (g C m ⁻² dia ⁻¹)	EMP (%)	EMA (g C m ⁻² dia ⁻¹)	EMP (%)
	22/02/2005	1.15	7.73	2.51	16.95
	10/03/2005	0.73	8.80	1.29	15.60
	11/04/2005	0.84	7.31	2.00	17.48
	13/05/2005	0.00	3.33	0.01	16.58
	29/05/2005	0.00	1.97	0.03	18.31
	14/06/2005	0.02	1.20	0.48	25.22
	16/07/2005	0.01	0.65	0.59	25.93
	01/08/2005	0.01	0.47	0.74	26.15
	17/08/2005	0.04	2.10	0.48	24.09
	21/11/2005	0.44	3.43	2.89	22.40
	Média	0.33	3.70	1.10	20.87

EMA: erro médio absoluto; EMP: erro médio percentual.

4.8 Análise da sensibilidade da GPP às variáveis envolvidas no seu cômputo através do sensoriamento remoto

Para o cômputo da produtividade primária bruta (GPP) via sensoriamento remoto, utilizou-se o modelo que baseia-se fundamentalmente na relação entre a eficiência de uso da luz (ϵ) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA), sendo dada por: $GPP = RFAA \times \epsilon$. Realizou-se uma análise da sensibilidade da GPP em relação a todas as variáveis envolvidas no seu cômputo, que consistiu em variá-las de -15 a 15%, com o objetivo de ver o impacto disso na GPP. As Tabelas 8 e 9 trazem o EMP, referentes a cada uma das variáveis. Observa-se que tanto para o ano de 2005-2006, quanto para o ano de 2015, o NDVI foi a variável que mais impactou a GPP, o que apresentou maior erro, seguido por PAR, Emax e FE, ou seja, modificando essas variáveis, há um maior impacto na GPP. Já a temperatura apresentou menor erro para os dois anos.

Tabela 8: Erro médio percentual (EMP) referentes ao impacto na GPP, ocasionado por mudança nas variáveis envolvidas no cômputo através de sensoriamento remoto, para o ano de 2005.

2005	-15%	-10%	-5%	5%	10%	15%
PAR	15.0	10.0	5.0	5.0	10.0	15.0
Tdia	3.24	2.51	1.46	1.93	4.37	7.26
Tdia	5.73	3.22	1.34	1.05	1.98	3.00
NDVI	18.61	12.40	6.20	6.20	12.40	18.61
E _{max}	15.0	10.0	5.0	5.0	10.0	15.0
FE	15.0	10.0	5.0	5.0	10.0	15.0

Tabela 9: Erro médio percentual (EMP) referentes ao impacto na GPP, ocasionado por mudança nas variáveis envolvidas no cômputo através de sensoriamento remoto, para o ano de 2015.

2015	-15%	-10%	-5%	5%	10%	15%
PAR	15	10	5	5	10	15
Tdia	2.04	1.57	0.91	1.25	2.96	5.23
Tdia	4.83	2.47	0.91	0.48	0.75	0.93
NDVI	18.79	12.53	6.26	6.26	12.53	18.79
E _{max}	15	10	5	5	10	15
FE	15	10	5	5	10	15

5 Conclusões

- A sazonalidade do GPP responde a precipitação e a radiação para os dois sítios experimentais, no entanto para a cana-de-açúcar, além das variáveis meteorológicas, há influência do estado fenológico da cultura e modo de preparo do solo;
- As imagens Landsat tiveram maior eficiência para a estimativa da GPP para cana-de-açúcar;
- O cerrado se comportou como sumidouro de carbono durante todo o ano, mesmo com precipitação abaixo da média, o que evidencia a necessidade de preservação deste bioma;
- Nos meses de maio e junho, a cana-de-açúcar se comportou como fonte de carbono, devido a baixa precipitação dos meses anteriores, além de que ocorreram queima da palha acumulada e aragem do solo;
- O valor de $R^2 = 0,9776$ demonstra existir uma elevada correlação entre PAR e R_g , possibilitando o uso das equações para estimativa de PAR em função de R_g para Santa Rita do Passa Quatro, ou regiões que apresentem condições climáticas semelhantes.
- Na ausência de medidas da PAR recomenda-se utilizar os modelos $PAR = 0.3787 R_g$ para o cálculo da GPP, para Santa Rita do Passa Quatro, ou regiões que apresentem condições climáticas semelhantes, visto que esse apresenta menores erros;
- Os valores de H e G foram superiores aos de LE, de maio a setembro para a cana-de-açúcar, resultando em menores valores de GPP para este período, devido ao estágio fenológico inicial da cultura, o que representa uma menor fixação de carbono pela mesma. Além de serem os meses com menor precipitação.
- Mudanças no NDVI causam maior impacto no cálculo da GPP, via sensoriamento remoto.

6 Referências Bibliográficas

AGUIAR, R. G.; RANDOW, C. V.; PRIANTE FILHO, N.; MANZI, A. O.; AGUIAR, L. J. G.; 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.

ALADOS, I. et al. Photosynthetically active radiation: measurements and modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, p. 121-131, 1996.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 2002.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007.

ALVALÁ, R.C.S.; SILVA, F.W.C. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e a irradiância de onda curta em área de policultivo na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. (Editado em CD-ROM).

BALDOCCHI, D.D.; HINCKS, B.B.; MEYERS, T.P. Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases with Micrometeorological Methods. **Ecology**, v.69, p.1331-1340, 1988.

BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v.9, p.479-492, 2003.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLSLAG, A. A. M. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.94, p.321-340, 2003.

BEER, C.; REICHSTEIN, M.; TOMELLERI, E.; CIAIS, P.; JUNG, M.; CARVALHAIS, N.; RÖDENBECK, C.; ARAIN, M. A.; BALDOCCHI, D.; BONAN, G. B.; BONDEAU, A.; CESCATTI, A.; LASSLOP, G.; LINDROTH, A.; LOMAS, M.; LUYSSAERT, S.; MARGOLIS, H.; OLESON, K. W.; ROUPSARD, O.; VEENENDAAL, E.; VIOVY, N.; WILLIAMS, C.; WOODWARD, F. I.; PAPAIE, D. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate. **Science**, v.329, n.5993, p.834-838, 2010.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.305-317, 2008.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; CORTEZ, J. R. G.; BRANDÃO, Z. N. Evapotranspiração real obtida através da relação entre o coeficiente dual de cultura da FAO-56 e o NDVI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, p.404-414, 2010.

BIUDES, M., S.; SOUZA, M., C.; MACHADO, N., G.; DANELICHEN, V., H., M.; VOURLITIS, G., L.; NOGUEIRA, J., S. Modelling gross primary production of a tropical semi-deciduous forest in the southern Amazon Basin. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, p. 1540-1562, 2014.

BORGES, C. K.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, L. L.; CARNEIRO, R. G.; ANDRADE, A. M. D. Variação sazonal dos fluxos de energia em áreas de caatinga preservada e degradada no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.09, n.05, p. 1313-1321, 2016.

BRASIL. Ministério de Mina e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. Serviço Geológico do Brasil. Superintendência Regional de São Paulo. Atlas Ambiental das Bacias dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo, SP: subsídios para o planejamento territorial e gestão ambiental. Coordenadoria de Planejamento Ambiental, 77p, 2000.

CABRAL, O. M. R.; GASH, J. H.C.; ROCHA, H. R.; MARSDEN, C.; LIGO, M. A.V.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D.; GOMES, E. Fluxes of CO₂ above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, n.1, p.49-59, 2011.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H. C.; LIGO, M. A. V.; RAMOS, N. P.; PACKER, A. P.; BATISTA, E. R. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.182-183, p. 54-66, 2013.

CANADELL, J.G.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M.R.; FIELD, C.B.; BUITENHUIS, E.T.; CIAIS, P.; CONWAY, T.J.; GILLETT, N.P.; HOUGHTON, R.A.; MARLAND, G. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, Forests 2016, 7, 35 16 of 18 carbon intensity, and efficiency of natural sinks. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA** 2007, 104, 18866–18870.

CHAPIN, F., S.; MATSON, P., A.; MOONEY, H., A. **Principles of terrestrialecosystem ecology**. 2 Edição. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 546p.2011.

COUTINHO, L. M. O conceito do Cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, v.1, n.1, p. 17-23, 1978.

DAUGHTRY C.S.T.; McMURTREY III, J. E.; CHAPPELLE, E. W.; DULANEY, W. P.; IRONS, J. R.; SATTERWHITE, M. B. Potential for discriminating crop residues from soil by reflectance and fluorescence. **Agronomy Journal**, v.87, n.2, p.165-171, 1995.

EITEN, G. Delimitação do Conceito do Cerrado. *Vegetalia* 18. São José do Rio Preto: IBILCE, UNESP, 1981.

FERREIRA, I. M. O Afogar das Veredas: Uma análise comparativa espacial e temporal das veredas do chapadão de Catalão (GO). Tese de Doutorado. Rio Claro: IGCE, UNESP, 2003.

FERREIRA, I. M.; TROPMAIR, H. Consequências da Ocupação dos Cerrados: Morte do subsistema veredas. Florianópolis, ANAIS 5º ANPEGE, 2003.

FEARNSIDE, F., M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, p. 23–38, 2001

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.74-88, 1995.

FOKEN, T., WIMMER, F., MAUDER, M., THOMAS, C., LIEBETHAL, C. Some aspects of the energy balance closure problem. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 3381-3402, 2006.

GALLON, M. M. P.; SANCHES, L.; PAULO, S. R. DE. Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel uma floresta tropical de transição amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3, p.79-88, 2006.

GALVÍNCIO, J. D.; SILVA, B.B.; MOURA, M.S.B.; MACHADO, C.C.C.; SILVA, H.A.; OLIVEIRA, T.H. Relationship between Vegetation Indices and Canopy Chlorophyll in GPP Estimation. **ASABE Annual International Meeting**, Dallas, (2012).

GOMES, H. F. **Balances de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**, 119p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2009.

HILKER, T.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; BLACK, T. A.; GUY, R. D. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. **Science of the Total Environment**, v.404, p.411- 423, 2008.

IRMAK, S., PAYERO, J. O., KILIC, A., ODHIAMBO, L. O., RUDNICK, D., SHARMA, V., BILLESBACH, D. On the magnitude and dynamics of eddy covariance system residual energy (energy balance closure error) in subsurface drip-irrigated maize field during growing and non-growing (dormant) seasons. **Irrigation Science**, v. 32, n. 3, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2010. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/santa-rita-do-passa-quatro/panorama>>. Acesso em 06 de junho de 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Índice de Vegetação da Diferença Normalizada. Disponível em <<http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/climatologia/ivdn/?jsessionid=2a9072079df1352d61c34fabd0d9>>. Acesso em 23 de maio de 2017.

LEFSKY, M. A.; TURNER, D. P.; GUZY, M.; COHEN, W. B. Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity. **Remote Sensing of Environment**, v.95, p.549-558, 2005.

LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation.4th Edition.John, Wiley & Sons, Inc.New York, p.73, 1993.

LIU, M.; WU, J.; ZHU, X.; HE, H; JIA, W.; XIANG, W. Evolution and variation of atmospheric carbon dioxide concentration over terrestrial ecosystems as derived from eddy covariance measurements. **Atmospheric Environment**, v. 114, p. 75 e 82, 2015.

LONGLEY, PAUL A., MICHAEL F. GOODCHILD, DAVID J. MAGUIRE, DAVID W. RHIND. **Geographic Information Systems and Science**, 2rd Edition.John Wiley & Sons, p. 202, 2005.

LOSSARDO, L. F. ; LORANDI, R. Caracterização das Potencialidades e Fragilidades Ambientais do Meio Físico de Parte de Município de Santa Rita do Passa Quatro (SP). **Geociências**, v. 29, p. 389-399, 2010.

MACHADO. R.B.; NETO, M.B.R.; PEREIRA, P.G.; CALDAS E.F.; GONÇALVES D.A.; SANTOS N.S.; TABOR K.; STEININGER, M. Estimativas de perda do cerrado brasileiro. Conservação Internacional. Brasília, 2004.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v.28, n.2, p.329-334, 2005.

MADUGUNDU, R.; AL-GAADI, K. A.; TOLA, E.; KAYAD, A. G.; JHA, C. S. Estimation of gross primary production of irrigated maize using Landsat-8 imagery and Eddy Covariance data. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v.24, p.410–420, 2017.

MARKHAM, B. L. & BARKER, J. L. Thematic Mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.3, p. 517-523, 1987.

MIRANDA, A. C.; MIRANDA, H. S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; MCINTYRE, J. A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J. Carbon dioxide fluxes over a cerrado sensu stricto in

central Brazil. In **Amazon deforestation and climate**. Victoria, editores. John Wiley & Sons Ltd., England, 1996, pp.353-363.

MITTERMEIER RA, MYERS N, MITTERMEIER CG. **Hotspots: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions**. Mexico City:CEMEX. 2000.

McCREE, K.J. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 3, p. 353-366, 1966.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, v.9, p.747-766, 1972.

MORAN, M. S.; MAAS, S. J.; PINTER, P. J. Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. **Remote Sensing Reviews** 12, 335-353, 1995.

MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; SILVA, B. B.; MACHADO, C. C. C.; SILVA, H. A.; OLIVEIRA, T. H. Gross primary production using related vegetation indices. **ASABE Annual International Meeting**, Dallas, (2012).

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A. B, KENT J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v.403, p. 853-858. 2000.

NASCIMENTO, R. de S. **Estimativa da variabilidade da quantidade de carbono absorvido pela caatinga**. 2011. 114f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2011.

ODUM, E. P. **Ecologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1983. 434 p.

OLIVEIRA, M. B. L., SANTOS, A. J. B., MANZI, A. O., ALVALÁ, R. C. S., CORREIA, M. F., MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p. 378-386, 2006.

PAN, S., TIAN, H., DANGAL, S.R.S., OUYANG, Z., TAO, B., REN, W., LU, C., RUNNING, S. Modeling and monitoring terrestrial primary production in a changing global environment:

toward a multiscale synthesis of observation and simulation. **Advances in Meteorology**, v.2014, p.17, 2014.

PIRES NETO, A.G.; ROCHA, H.R.; COOPER, M. & SHIDA, C. N. :Caracterização física do Cerrado Pé de Gigante e uso das terras na região–parte I: Fisiografia da região. In: PIVELLO & E. M. VARANDA. **O Cerrado do pé-de-gigante: ecologia e conservação – parque estadual de vassununga**. Imprensa oficial do estado de São Paulo, secretaria do meio ambiente (SMA), São Paulo, p. 15 – 28, 2005.

PIVELLO, V.R.; BITENCOURT, M.D.; MANTOVANI, W.; MESQUITA JR., H.N.; BATALHA, M.A.; SHIDA, C. Proposta de zoneamento ecológico para a reserva de cerrado Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP). **Revista Brasileira de Ecologia**, v.2, p.108-118, 1998.

RICKLEFS, R. E. **The Economy of Nature**. 6. ed. New York, W. H. Freeman, p. 416, 2010.

ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; ROSOLEM, R.; JUÁREZ, R. I. N.; TANNUS, R. N.; LIGO, M. A.; CABRAL, O. M. R.; DIAS, M. A. F. S. Measurements of CO₂ exchange over a woodlandsavanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brasil. **Biota Neotropica**, v.2, n.1, p.1-11, 2002.

ROCHA, H.R. et al. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. **Ecological Application**, v. 14, p. S22-S32, 2004.

RODDA, S.R.; THUMATY, K.C.; JHA, C.S.; DADHWAL, V.K. Seasonal Variations of Carbon Dioxide, Water Vapor and Energy Fluxes in Tropical Indian Mangroves. **Forests**, v.7, p.35, 2016.

RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; GOLTZ, E.; AULICINO, T. L. I. N.; CARVALHO, M. A.; ARENAS-TOLEDO, J. M.; BRANDÃO. **Determinação da área cultivada com cana-de-açúcar na região centro-sul por meio de imagens de satélite de sensoriamento remoto - safras 2005/06 a 2008/09**. São José dos campos: inpe, 151 p. 2009.

RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HEINSCH, F. A.; ZHAO, M. S.; REEVES, M.; HASHIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. **Bioscience**, v.54, n.6, p. 547–560, 2004.

RUNNING, S., MU, Q., ZHAO, M. *MOD17A2H MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015.

SANTOS, F. A. C. **Estimativa dos fluxos de CO₂ e evapotranspiração em áreas de caatinga em recuperação e degradada no estado da Paraíba**. 122f. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

SANTOS, S. N. M.; COSTA, M. H. Simulações de fluxo de carbono em um ecossistema de floresta tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, n.1, p.87-96, 2003.

SÃO PAULO. Lei Estadual nº 719, de 1º de junho de 1950. Dispõe sobre a estância climática o município de Santa Rita do Passa Quatro, e dá outras providências.

SILVA, B. B. DA; LOPES, GLÁUCIA MIRANDA; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p.243-252, 2005.

SILVA, B. B. da; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, n.2, p.174-186, 2006.

SILVA, B. B. da; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, v.24, p.145-152, 2011.

SILVA, B. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACHADO, C. C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MOURA, M. S. B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p.57-64, 2013.

SOUZA, L. S. B. **Análise sazonal dos fluxos de carbono, energia e vapord'água em um ecossistema de caatinga durante um ano seco em Petrolina-PE**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa – MG, 89 f., 2014a.

SOUZA, M., C., BIUDES, M., S., DANELICHEN, V., H., M., MACHADO, N., G., DEMUSIS C., R., VOURLITIS, G., L.; NOGUEIRA, J., S. Estimation of gross primary production of the Amazon-Cerrado Transitional Forest by remote sensing techniques. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, p.1-12, 2014.

STEIDLE NETO, Antonio J. et al. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande , v. 12, n. 6, p. 626-631, 2008.

THENKABAIL, P. S. Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing, **Remote Sensing Handbook**. 1 ed. CRC Press, 2015.849 p. 2015.

VEENENDAAL, E.M.; KOLLE, O.; LLOYD, J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. **Global Change Biology**, v. 10, p. 318-328, 2004.

VERMA, S.B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, v.5, p.99-115,1990.

VOURLITIS, G., L.; DA ROCHA, H., R. **Flux dynamics in the Cerrado and Cerrado- Forest Transition of Brazil. 2010. In: Ecosystem Function in Global Savannas: Measurement and Modeling at Landscape to Global Scales.** (eds. Hill, M.J. e Hanan, NP). Boca Raton, FL, USA, p. 97-116, 2010.

YUAN, W.; LIU, S.; YU, G.; BONNEFOND, J. M.; CHEN, J.; DAVIS, K.; DESAI, A. R.; GOLDSTEIN, A. H.; GIANELLE, D.; ROSSI, F.; SUYKER, A. E.; VERMA S. B. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1416–1431, 2010.

WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W.; RIVARD, B.; FENG, J. Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1015–1021, 2009.

XIAO, X. M.; ZHANG, Q. Y.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFSY, S.; MOORE, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf

forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v.91, n.2, p.256-270, 2004.

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v.95, p.164–176, 2005.