

LUCA GOMES NUNES

**USO DO ALGORITMO DE SEBAL PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UM POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

Botucatu

2023

LUCA GOMES NUNES

**USO DO ALGORITMO DE SEBAL PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UM POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre pelo programa de pós-graduação em ciência florestal.

Orientador(a): Dr. Clayton Alcarde Alvares

Botucatu

2023

N972u Nunes, Luca Gomes
Uso do algoritmo de SEBAL para estimativa da evapotranspiração
em um povoamento de eucalipto / Luca Gomes Nunes. -- Botucatu,
2023
59 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Clayton Alcarde Alvares

1. Penman monteith. 2. Evapotranspiração. 3. Landsat8. 4.
Sensoriamento remoto. 5. florestal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

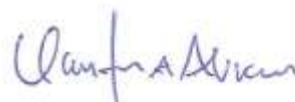
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: USO DO ALGORITMO DE SEBAL PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

AUTOR: LUCA GOMES NUNES

ORIENTADOR: CLAYTON ALCARDE ALVARES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência Florestal, pela
Comissão Examinadora:

Pesquisador Dr. CLAYTON ALCARDE ALVARES (Participação Virtual)
Tecnologia Florestal / Suzano Papel e Celulose



Prof. Dr. RAFAEL CESAR TIEPPO (Participação Virtual)
Agronomia / Universidade do Estado de Mato Grosso



Prof.ª Dr.ª ANA CLAUDIA DOS SANTOS LUCIANO (Participação Virtual)
Engenharia de Biosistemas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz



Botucatu, 29 de agosto de 2023

*Este trabalho é dedicado aos meus pais
Virgolino e Wilma*

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais pelo apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. José, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor.

Ao Prof. o Dr. Clayton Alcarde Alvares, grato pela orientação, ensinamento, vivência, instrução e principalmente pela paciência e serenidade, ao longo desta trajetória acadêmica. Notório que seu apoio foi essencial e primordial para que chegasse até aqui.

À minha família, ao meu pai Virgolino, minha mãe Wilma, irmã Sarah, a minha esposa Carolyne. Onde, indiretamente, me auxiliaram na execução deste trabalho, incentivando-me e fazendo com que não desistisse.

Aos discentes, que com tempo tornaram-se grandes amigos: Jhuan, Caio, Roldão, Jenickson, Cassiano, Roberta, Fernanda. Deixo aqui, minha enorme gratidão.

A todos os pesquisadores e docentes, os meus sinceros agradecimentos, com ênfase a Guerric Beaudouin Cathel Marie LE MAIRE, Rafael Cesar Tieppo, Otávio Camargo Campoe, Magali Ribeiro da Silva e Danilo Simões por todo aporte recebido.

Por fim, agradeço ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - pela bolsa de estudos concedida e ao CIRAD, sem este apoio essa conquista seria impossível.

RESUMO

A evapotranspiração (ET) desempenha um papel fundamental na conservação da biodiversidade, sendo responsável por aproximadamente 65% das precipitações continentais. Assim, sua compreensão se tornou imprescindível para o entendimento do ciclo hidrológico. Devido à complexidade dessa variável diversos estudos propõem sua quantificação – a exemplos Thornthwaite, Priestley-Penman-Monteith, Doorenbos & Pruitt, Rosenberg entre outros. Apesar da eficiência das metodologias citadas, suas estimativas são limitadas a pontos específicos, assim para contornar essa problemática foi proposto o uso do sensoriamento remoto, sendo o algoritmo de SEBAL uma das metodologias mais empregas. Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar o desempenho do algoritmo de SEBAL para um cultivo de eucalipto em diferentes anos. A metodologia utilizada foi feita com base no manual de treinamento avançado de SEBAL publicado por WATERS et al. (2002), a área contempla um cultivo de eucalipto, clone C219, localizada no município de Itatinga-SP, nos anos de 2013 a 2018. Para a delimitação do estudo foram selecionadas 46 imagens provenientes do Landsat8, das quais foram escolhidas com base na ausência de nuvens, não sendo aplicado nenhuma máscara de nuvens. Nos dados meteorológicos foi utilizado uma torre de fluxo presente no local, a qual possui os dados observados de evapotranspiração (ET) além dos dados climáticos. Como dados de entrada para o algoritmo de SEBAL foi utilizada os valores da ET diária e horário estimadas pelo método de Penman Monteith (FAO – 56) e a velocidade do vento. A seleção dos pixels âncoras foi dividida em duas formas, sendo feita a seleção do pixel quente para ambas a partir dos pixels com os 5 % dos menores índice da diferença normalizada (NDVI) e os 20 % das maiores temperatura de superfície (Ts), para o pixel frio realizado com os 5 % dos maiores e 20% do menos e para a segunda o pixel que continha somente água. O algoritmo de SEBAL demonstrou a característica de superestimação dos dados, sendo o melhor resultado observado no uso do pixel frio água

Palavras-chave: Penman Monteith; ET; sensoriamento remoto; landsat8; floresta.

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) plays a key role in biodiversity conservation, being responsible for about 65% of continental precipitation. Thus, ET comprehension is essential for understanding the hydric cycle. Due to the complexity of this variable, several studies propose its quantification, such as Thornthwaite, Priestley, Penman-Monteith, Doorenbos & Pruitt, and Rosenberg among others. Despite the efficiency of the mentioned methodologies, their expectations are limited to specific points, to overcome this problem we proposed the use of remote sensing, the SEBAL algorithm the most used methodology. In this context, the objective of this study was to evaluate the performance of the SEBAL algorithm for a eucalyptus forest at different years. The methodology used was based on the SEBAL advanced training manual published by WATERS et al. (2002), the area includes eucalyptus cultivate, clone C219, located in the municipality of Itatinga-SP, from 2013 to 2018. For the delimitation of the study, 46 images from Landsat 8 were selected, from which they were chosen based on the absence of clouds, with no cloud mask being applied. In the meteorological data, a flow tower present at the site was used, which gives the data of ET combine to climate data. As input data for the SEBAL algorithm, the values of daily and hourly ET estimated by the Penman-Monteith method (FAO – 56) and wind speed were used. The selection of anchor pixels was divided into two ways, the hot pixel being selected for both from the pixels with the 5% of the smallest Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the 20% of the largest surface temperature (T_s), for the cold pixel made with the 5% of the largest and 20% of the least and for the second the pixel that contained only water. The SEBAL algorithm demonstrated the characteristic of data overestimation, with the best result observed in the use of the cold water pixel.

Keywords: Penman Monteith; ET; sensing remote; landsat8; forest.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ET	Evapotranspiração
λ ET	Fluxo de calor latente
ET inst	Evapotranspiração instantânea
ET rF	Fração de evapotranspiração de referência
Cp	Calor específico do ar
d	deslocamento do plano zero
d_{e^s}	Distância relativa terra- sol
d r	Inverso ao quadrado relativo terra sol
G	Fluxo de calor do solo
H	Fluxo de calor sensível
k	Constante de von Karman
eu	Comprimento Monin Obukhuv
$L\lambda$	Radiância espectral para banda λ
r ah	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor
Rn	Fluxo líquido de radiação na superfície
RS ↓	Radiação de onda curta de entrada.
RL ↓	Radiação de onda longa de entrada
RL t	Radiação de onda longa de saída
ϵ_o	Emissividade da superfície
Rc	Radiância térmica corrigida da superfície
Rp	Radiância do caminho da banda
céu R	Banda estreita térmica
Ta	Temperatura da superfície do ar
Ts	Temperatura da superfície
u	Velocidade do vento

LISTA DE SÍMBOLOS

R^2	coeficiente de correlação
%	porcentagem
mm	Milímetros
°C	graus Celsius
M/S	metro por segundo
KPa	kilo Pascal
mm d	milímetros por dia
KPa °C	kilo Pascal por graus Celsius
MJ m ² d	megajoule por metro por quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1	Métodos micrometereológicos.....	23
2.2	Método do balanço hídrico	23
2.3	Equações na estimativa da ET.....	24
2.4	Sensoriamento remoto associado a ET.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1	Delineamento do estudo.....	26
3.2	Temporalidade do estudo.....	27
3.3	Etapas do estudo.....	27
3.4	Equações do modelo	30
3.4.1	Fluxo líquido de radiação na superfície (RN).....	30
3.4.1.1	Albedo de superfície (α).....	30
3.4.1.2	Radiância espectral para cada banda (L_λ) para o Landsat8....	30
3.4.1.3	Refletividade para cada banda (ρ_x).....	31
3.4.1.4	Albedo no topo da atmosfera.....	31
3.4.1.5	Radiação de onda longa de entrada ($R_{s\downarrow}$).....	32
3.4.1.6	Radiação de onda longa de saída ($R_{L\uparrow}$).....	32
3.4.2	Emissividade da superfície (ε)	33
3.4.3	Radiância terminada corrigida (R_c)	33
3.4.4	Radiação de onda curta de saída ($R_{L\uparrow}$)	34
3.4.5	Radiação de onda curta de entrada ($R_{s\downarrow}$)	34
3.4.6	Fluxo de calor do solo (G).....	34
3.4.7	Fluxo de calor sensível (H).....	35
3.4.8	Velocidade do vento	35
3.4.9	Velocidade de atrito (u^*) para cada pixel.....	36
3.4.10	Fluxo de calor latente (LET).....	37
4	RESULTADOS.....	39
5	DISCUSSÃO.....	53
6	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de madeira ao longo dos anos vem intensificando a necessidade do plantio de espécies florestais de rápido desenvolvimento, dentre elas, o gênero *Eucalyptus*. Esse gênero também conhecido popularmente como eucalipto, apresenta altas taxas de crescimento e adaptação para diferentes regiões (SCHWIDER et al., 2013; SOUZA et al., 2006). Apesar dos resultados satisfatórios apresentados pela implantação dessa monocultura, inúmeros fatores influenciam no desenvolvimento e na produção dos plantios de eucalipto, dentre elas, as variáveis climáticas (MENEZES et al., 2011). Essas variáveis compõem um dos principais fatores limitantes em um plantio, deste modo, diversos estudos são fundamentados na compreensão dessas variáveis e suas respectivas influências na silvicultura – a exemplo a evapotranspiração (ET) (CUNHA et al., 2009).

A ET pode ser definida como a somatória da transpiração das plantas e evaporação da água presente na superfície terrestre (WEI et al., 2017). Essa combinação desempenha funções essenciais no clima, ciclo de carbono e hidrológico, visto que, 65% da precipitação sob áreas continentais são provenientes da evapotranspiração (KICH, 2018; FISHER et al., 2017). O volume das partículas de água provenientes desse processo é redistribuído em diferentes quantidades, portanto, a quantificação de água é fundamental em inúmeras áreas de estudo, com ênfase para o sistema agrícola (KICH, 2018).

A quantificação da ET nas áreas de cultivo do eucalipto permite a compreensão do consumo da cultura, uma vez que, a crença da alta demanda hídrica do eucalipto, muitas vezes associada ao ressecamento do solo e desaparecimento de nascentes e cursos hídricos foi amplamente difundida na sociedade. Diversos estudos buscam compreender a relação do eucalipto com o uso sustentável da água- a exemplo, o estudo o qual abordou a comparação dos valores médios anuais da ET e precipitação em função da vegetação, sendo observado as amplitudes para ET (966 mm – 1721 mm) e precipitação de (1769 mm – 2870 mm) em áreas abrangentes da floresta Amazônica, ET (902 mm – 1186 mm) e precipitação (1352 mm e 1588 mm) em áreas de cultivo de eucalipto (ZHANG, DAWES e WAKER, 2001).

Dentre as metodologias mais utilizados para quantificação da ET, destacam-se o uso de lisímetros, balanço hídrico ou ainda estações meteorológicas, as quais disponibilizam dados que posteriormente são calculados em métodos – a exemplos

Thorntwaite, Priestley, Penman – Monteith, Doorenbos & Pruitt, Rosenberg entre outros (PEREIRA et al., 1997; BRUSAERT, 2005).

Apesar das estimativas da ET, pelos métodos citados esses métodos são limitados a pontos específicos, não podendo ser aplicadas em escala regional (BASTIAANSEN et al., 2005; MENEZES et al., 2011). Como alternativa para contornar essa limitação é implementado o uso das imagens orbitais, as quais possibilitam ampliar a área de estudo, assim, as informações disponibilizadas são regionais. Ainda que diversos autores prezem a quantificação da ET, seu nível de precisão ainda é baixo quando relacionado a áreas extensas com ênfase na cultura do eucalipto. A ausência de estudos que validem as estimativas da ET na cultura do eucalipto dificultam a compreensão do consumo hídrico da cultura e ciclo hidrológico. A partir do uso do sensoriamento remoto foram desenvolvidas diversas técnicas para predição da ET, como métodos de balanço de energia, base física, empíricos e estatísticos, que além de possibilitar a estimativa regional, não necessitam quantificar os diversos processos hidrológicos, os quais ainda são pouco compreendidos (ANDRADE et al., 2009; LI et al., 2009; KICH, 2018;). Dentre os métodos mais aplicados na estimativa da ET por meio de informações orbitais é possível destacar o algoritmo MOD16 (Mu et al., 2011) que utiliza dados provenientes do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e informações do Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) e o algoritmo de SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*).

O modelo de SEBAL é um algoritmo capaz de realizar a predição da ET em escalas regionais, onde através de rotinas computacionais, da qual consiste na estimativa do fluxo de calor latente (LE) e ET por meio de dados meteorológicos auxiliares, imagens termais e multiespectrais (WATERS et al., 2002). Além disso, é empregado um processo de calibração denominado CIMEC (*Calibration Using Inverse Modeling at Extreme Conditions*), que consiste na seleção de dois pixels âncoras, os quais configuram pontos extremos de umidade e temperatura (BASTIAANSEN et al., 1998; WATERS et al., 2002).

Esses dados podem ser obtidos de qualquer plataforma orbital, desde que, os mesmos possuam sensores termais e espectrais, como os satélites MODIS e Landsat 8, 7 e 5, que são amplamente utilizados no modelo de SEBAL com resultados satisfatórios (RUHOFF et al., 2012; SCHIRMBECK, 2017; KICH, 2018; SANTOS, 2020).

Diante do exposto esse estudo visa avaliar a viabilidade do uso do algoritmo de

SEBAL para a estimativa da evapotranspiração de um povoamento de eucalipto em diferentes fases de uma rotação.

Hipóteses

H0 – O Algoritmo de SEBAL **não é capaz de gerar** previsões acuradas de ET para a cultura do eucalipto;

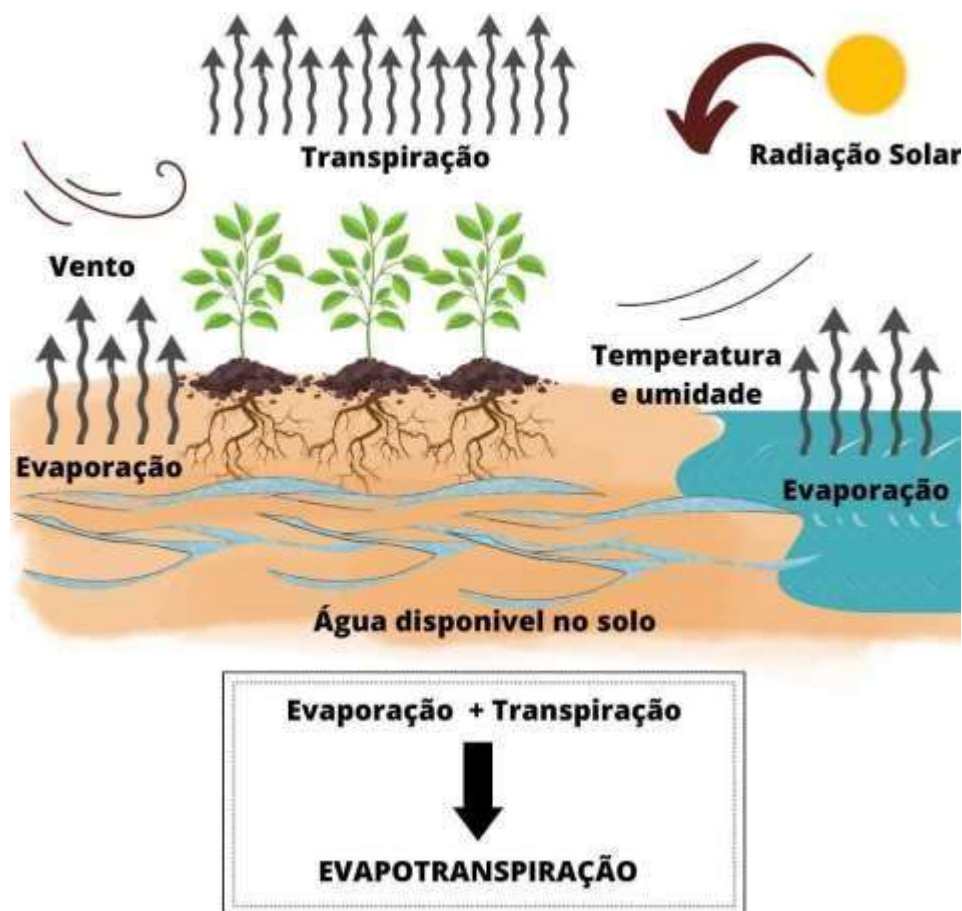
H1 - O Algoritmo de SEBAL **é capaz de gerar** previsões acuradas de ET para a cultura do eucalipto.

Diante do exposto esse estudo visa avaliar a viabilidade do uso do algoritmo de SEBAL para a estimativa da evapotranspiração de um povoamento de eucalipto em diferentes fases de uma rotação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A ET constitui um componente essencial para o ciclo hidrológico, clima e ciclo do carbono, desempenhando um papel fundamental na manutenção da biodiversidade, uma vez que, cerca de 65 % da precipitação em áreas continentais é advinda da ET. Esse processo pode ser compreendido como a conversão da água em seu estado líquido em vapor d'água, por meio do processo de evaporação da água (rios, lagos e oceanos) e da transpiração da vegetação (KICH, 2018; FISHER et al., 2017), como é ilustrado pela Figura 1. Apesar da importância da compreensão dessa variável, os estudos acerca dos processos hidrológicos ainda são pouco conhecidos (ANDRADE et al., 2009).

Figura 1 - Escala de notas para a variável qualidade da raiz



Fonte: Adaptado de Carleton College (2020).

2.1 Métodos micrometereológicos

Esse método consiste em determinar a ET através do vapor de água contido no ar, por meio de medições na camada de ar turbulenta próxima ao solo, provenientes da vegetação, solo, rios e lagos. Dentre os métodos mais utilizados destacam-se a correlação de vórtices turbulentos e razão de Bowen, já que ambas apresentaram alta precisão na estimativa da ET, valores esses observados por diversos autores na cultura do feijão, por exemplo, onde foram obtidas correlações de 0,87 para a razão de Bowen em comparação a outros métodos de estimativa (PAULA, 2018).

A razão de Bowen compreende a metodologia na qual, em qualquer ponto da atmosfera é estimado a soma do calor sensível e latente como o resíduo do balanço de energia, a partir de valores obtidos na equação que podem ser medidos (KICH, 2018).

Para o método de correlação de vórtices turbulentos é considerado que há um movimento ascendente do vapor d'água, na qual o ar é turbulento, indicando uma correlação positiva entre a flutuação de umidade do ar acima da média e velocidade vertical do ar, deste modo, são realizadas medições de forma simultâneas da velocidade do vento perpendicular a superfície, umidade e temperatura (KICH, 2018).

2.2 Método do balanço hídrico

Os métodos baseados no balanço hídrico consistem na medição da perda líquida de água para a atmosfera, considerando uma determinada área e período. Esse método compreende a diferença entre os componentes medidos e não medidos, considerando a proposta de fechar o balanço hídrico (KICH, 2018). Dentre os métodos, destacam-se o tanque classe A que pode ser definido como um tanque com água, exposto ao ar livre, no qual regularmente é medido a evaporação e os lisímetros, que são equipamentos que medem a massa da variação de água em um volume de solo. Além desses métodos, também existem a depleção de umidade do solo e balanço hídrico em bacias hidrográficas, sendo métodos não tão aplicados, devido ao alto erro associado (SHUTTLEWORTH, 2012).

2.3 Equações na estimativa da ET

Compreende um conjunto de equações, que consistem em expressões matemáticas capazes de estimar a ET com base no balanço do resíduo hídrico ou energético e na transferência de massa (BRUSAERT, 2005). Dentre os modelos mais utilizados destacam-se o método de Penman-Monteith-FAO 56, Penman Original, Blaney-Criddle-FAO24, Priestley-Taylor, Jensen-Haise, Camargo, Ivanov, Thornthwaite entre outros. Diversos autores corroboram a eficiência dos usos desses modelos – a exemplo o estudo realizado no município de Chapadão do Sul, que obteve valores ótimos para o método de Penman (CUNHA et al., 2013; CAMARGO et al., 1997).

2.4 Sensoriamento remoto associado a ET

O termo sensoriamento remoto pode ser caracterizado como uma técnica de aquisição de informações de um determinado local ou objeto na qual não haja a necessidade de contato com ele. Tal mapeamento permite observar a condição real da cultura e estimar variáveis que influenciam diretamente no desenvolvimento da planta, como a ET, objeto de estudo bastante significativo no campo do sensoriamento remoto, com uma ascensão ainda mais pronunciada nas últimas três décadas (ZHANG, KIMBALL e RUNNING, 2016). Uma das principais vantagens do uso do sensoriamento remoto está relacionada a uma maior área de estudo, uma vez que os modelos que utilizam dados orbitais são capazes de estimar a ET em áreas regionais (WATERS et al., 2002).

Apesar de nenhuma plataforma em órbita atualmente ser capaz de estimar diretamente a ET e não possuir os requisitos de escala espacial, temporal e radiométrica ideais, diversos métodos foram desenvolvidos para predição da ET – a exemplo os métodos de balanço de energia, base física, empíricos e estatísticos, que além de possibilitar a estimativa regional, não necessitam quantificar os diversos processos hidrológicos, os quais ainda são pouco compreendidos (ANDRADE et al., 2009; LI et al., 2009; KICH, 2018;). Dentre os modelos mais utilizados destaca-se os modelos de SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998), *Simplified Surface Energy Balance Index* (S-SEBI) (ROERINK; MENENTI, 2000), *Mapping Evapotranspiration at High*

Spatial Resolution with Internalized Calibration (METRIC) (ALLEN et al., 2008) e *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) (TEIXEIRA et al., 2008).

Além dos métodos desenvolvidos, o uso de diferentes plataformas orbitais tem apresentado grande influência nas estimativas da ET, uma vez que, cada plataforma possui uma resolução específica, tanto temporal, espacial, espectral e radiométrica. Diversos autores utilizam como método o modelo de SEBAL, contudo abordando diferentes imagens orbitais (BORATTO e GOMIDE, 2013) e ASTER (SANTOS et al., 2010) com resultados satisfatórios, contudo não foi realizada a validação dos dados.

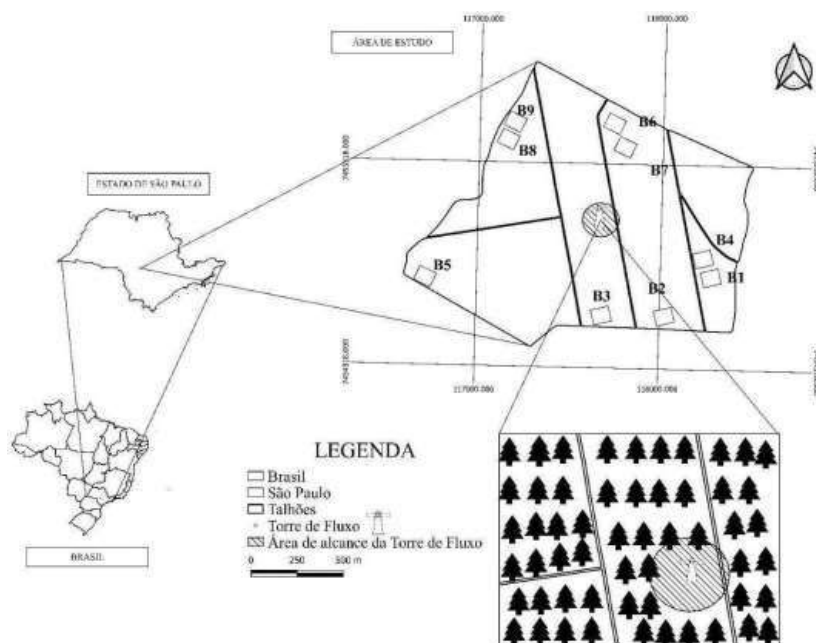
Atualmente algumas plataformas – a exemplo o projeto NASA/EOS MOD 16, que visa disponibilizar dados estimados da ET terrestre. Este algoritmo MOD16 utiliza dados provenientes do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e informações do Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), sendo uma revisão do algoritmo proposto por Cleugh et al., (2007), o qual adapta a equação de Penman Monteith com o uso de dados de sensoriamento remoto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Itatinga-SP, inserida na área experimental do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais estudos florestais - IPEF sob a Latitude: 22° 58.086'S, Longitude: 48° 43.677'O (Figura 2).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima nesta área é do tipo Cfa. Clima subtropical úmido, verão longo (morno e abafado), inverno curto (ameno) com temperatura média variando entre 12° C a 29° C. O local foi designado em função da disponibilidade de dados provenientes de uma torre de fluxo presente no local, capaz de determinar com acurácia os níveis de ET em um raio de 70 metros.

Figura 2 – Delimitação da área de estudo e região



3.1 Delineamento do estudo

O estudo foi realizado em um plantio de eucalipto, entre as datas de 08/2013 a 05/2018, o qual avaliou o desempenho do algoritmo de SEBAL em diferentes fases fenológicas da cultura. Os dados de entrada foram provenientes do satélite LANDSAT 8, disponibilizado pela plataforma courtesy of the U.S. Geological Survey.

A definição do delineamento do estudo foi realizada com base na disponibilidade e qualidade das imagens da plataforma em conjunto com os dados previamente obtidos da torre de fluxo, para posterior validação dos resultados obtidos pelo

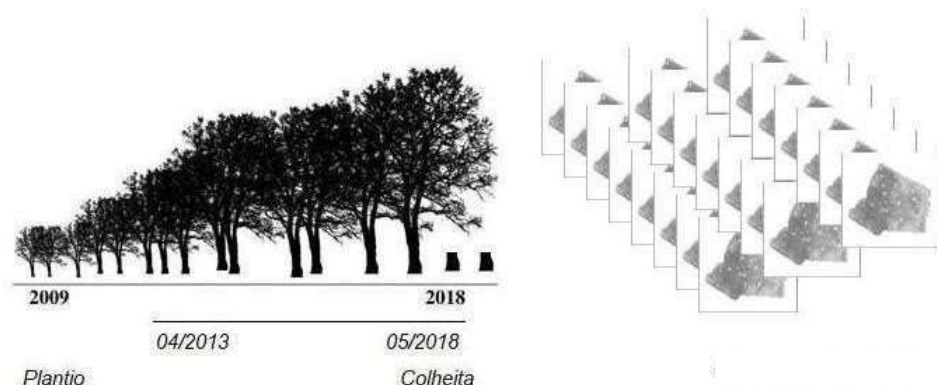
algoritmo. Deste modo, para este estudo foram totalizadas 51 amostras de dados. A análise da qualidade das imagens foi feita com base o proposto por Kich (2018), o qual define os seguintes parâmetros para seleção das imagens:

- Imagens com cobertura de nuvens inferior a 20 %, com foco na área da torre de fluxo;
- As imagens com cobertura de nuvens na área da torre foram descartadas;
- Não será aplicado máscara de nuvens.

3.2 Temporalidade do estudo

O estudo contemplou a temporariedade de 5 anos (2013 a 2018) para um plantio de eucalipto adulto, com idade inicial de 5 anos, até seu corte aos 10 anos (Figura 3), assim, utilizando apenas dados provenientes do Landsat 8.

Figura 3 – Determinação do tempo de análise do estudo



3.3 Etapas do estudo

O algoritmo de SEBAL tem como dados de entrada os valores obtidos pelo cálculo da evapotranspiração diária (Equação 1) e evapotranspiração horária (Equação 2) pelo método de Penman – Monteith (FAO - 56), calculados a partir de dados provenientes da torre de fluxo. Além desses dois valores, o algoritmo de SEBAL utilizados.

Equação 1.

$$ET0 = - \frac{0,408\Delta(Rn - G) + y \frac{900}{T + 273} u2 (es - ea)}{\Delta + y (1 + 0,34 u2)} \quad (1)$$

Onde:

ET0 = Evapotranspiração de referência (mm d);

Δ = Inclinação da curva de pressão de vapor;

Rn = Saldo diário de radiação;

G = Fluxo diário de calor no solo;

Y = Constante psicométrica.

T média = Temperatura média do ar;

U2 = Velocidade média diária do ar;

Es = Pressão de saturação de vapor d'água diária;

Ea = Pressão de vapor d'água diária ou pressão parcial;

Pa = Pressão atmosférica.

Equação 2.

$$ET0i = \frac{0,408 \Delta Rn - (G + y) \frac{37}{u2 (es - ea)}}{\Delta + y (1 + Cd u2)} \quad (2)$$

Onde:

ET0 = Evapotranspiração de referência (mm d);

Δ = Inclinação da curva de pressão de vapor;

Rn = Saldo diário de radiação;

G = Fluxo diário de calor no solo;

Y = Constante psicométrica;

T média = Temperatura média do ar;

U2 = Velocidade média diária do ar;

Es = Pressão de saturação de vapor d'água diária;

Ea = Pressão de vapor d'água diária ou pressão parcial;

Pa = Pressão atmosférica;

Cd = 0,24 (dia) ou 0,96 (noite).

As reprojeção e correções atmosféricas foram realizadas em todas as imagens analisadas, nesta etapa é realizada as observações das presenças de nuvens na área de estudo. Após a conferência e correção dos dados de entrada é realizado as

estimativas da ET com o uso do algoritmo de SEBAL. Nesta etapa também é realizado a seleção dos pixels ancoras, sendo eles o pixel frio e quente.

A definição do pixel frio (água) foi feita com base na seleção de um pixel ao acaso, desde que, ele seja composto apenas por água, sendo esta seleção realizada manualmente.

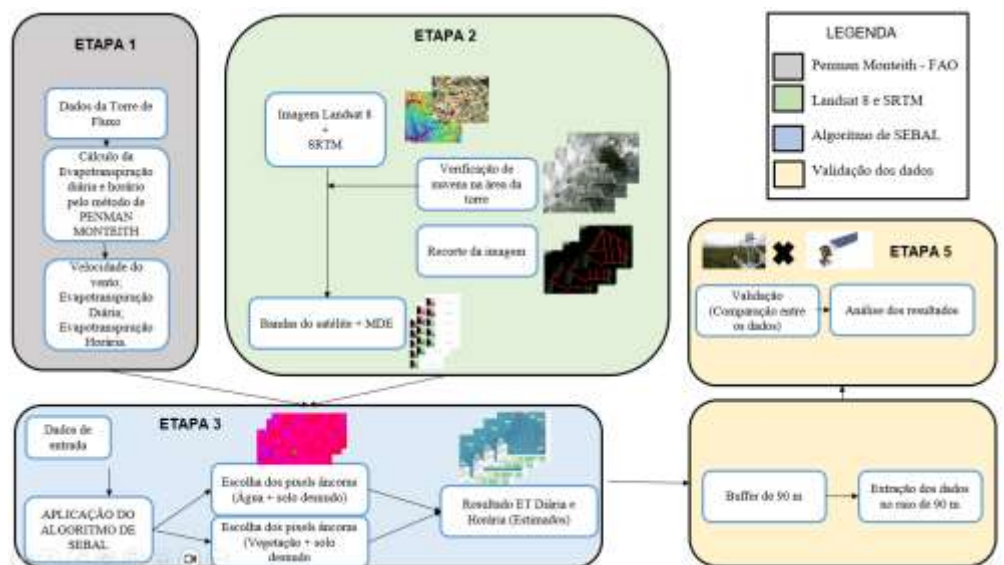
Os critérios na determinação do pixel frio (vegetação) foram realizados com base nos pixels que apresentem densa vegetação, a exemplo – florestas nativas – ou áreas irrigadas, que contemplem: os 5 % dos maiores índices de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e os 20 % das menores temperaturas de superfície (TS) (ALLEN et al., 2013).

A seleção do pixel quente foi empregada para ambas as metodologias sendo essa: os 5 % dos menores índices de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e os 20 % dos pixels com as maiores temperaturas de superfície (TS), onde normalmente são utilizadas áreas com solo desnudo (ALLEN et al., 2013).

Após as estimativas da área foi realizado um recorte (buffer) ao entorno da área da torre de fluxo, totalizando 16 pixels (Landsat8). Nesta etapa também é realizado a extração das informações da ET somente para área da torre, para posteriormente a comparação dos dados.

Por fim, é realizado a comparação dos dados estimados em função dos dados observados pela torre de fluxo, para posterior análise das estimativas.

Figura 4 – Descrição do delineamento e etapas utilizadas no estudo



3.4 Equações do modelo

O cálculo do algoritmo de SEBAL foi executado com base no manual de treinamento avançado de SEBAL (WATERS et al., 2002). Esse manual utiliza uma série de cálculos para a obtenção das variáveis: Fluxo Líquido De Radiação na Superfície (RN), Fluxo De Calor de Solo (G), Fluxo de Calor Sensível (H), as quais a partir da subtração desses resultados é possível estimar o fluxo de energia residual ou Fluxo de Calor Latente (λ ET) (Equação 1), que é utilizada para determinação da ET.

3.4.1 Fluxo líquido de radiação na superfície (RN)

O fluxo líquido de radiação na superfície (RN) é definido como a energia disponível real na superfície. O resultado dessa equação (Equação 2) foi obtido a partir da subtração de todos os fluxos de entrada e saída de radiação, sendo elas ondas curtas e longas.

$$R_n = (1 - \alpha)RS \downarrow + RL \downarrow - RL \uparrow - (1 - \varepsilon_0)RL \downarrow$$

Onde: em que, α é o albedo, RS Down é a radiação de ondas curtas incidente, RL up é a radiação de ondas longas refletida, ε_0 é a emissividade de superfície e RL down é a radiação de ondas longas incidente.

3.4.1.1 Albedo de superfície (α)

O albedo de superfície (α) pode ser compreendido como a razão entre a radiação refletida e a radiação de ondas curtas incidente. Ela foi calculada por meio das seguintes equações:

3.4.1.2 Radiância espectral para cada banda (L_λ), para Landsat e 8

$$L_\lambda = \frac{(L_{MAX} - L_{min})}{(Q_{CALMAX} - Q_{CALMIN})} * (DN - Q_{CALMIN}) + L_{MIN}$$

Onde: DN é o número digital de cada pixel, LMAX e LMIN são calibração constantes, QCALMAX e QCALMIN são o intervalo de valores mais alto e mais baixo para brilho redimensionado em DN. As unidades para L_λ são $W / m^2 / SR$.

3.4.1.3 Refletividade para cada banda (px)

$$P_\lambda = \frac{p_i * L_\lambda}{ESUN_\lambda * \cos \theta * d^2}$$

Onde: L_λ é a radiância espectral para cada banda calculada no modelo F01, $ESUN_\lambda$ é o irradiância solar exo-atmosférica média para cada banda ($W / m^2 / \mu m$), $\cos \theta$ é o cosseno de o ângulo de incidência solar (do nadir), e d é o inverso ao quadrado do sol da terra distância.

Cosseno θ foi calculado usando os dados do arquivo de cabeçalho sobre o ângulo de elevação do sol (β) onde $\theta = (90^\circ - \beta)$. O termo d é definido como $1 / d^2$ onde d é a distância relativa entre a terra e o sol em unidades astronômicas d foi calculado usando a seguinte equação de Duffie e Beckman(1980).

3.4.1.4 Albedo no topo da atmosfera

$$\alpha_{toa} = \sum (w_\lambda \times p_\lambda)$$

Onde: p_λ é a refletividade calculada na etapa 2 e w_λ é um coeficiente de ponderação para cada banda, de acordo com a fórmula abaixo:

$$w_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda}$$

Onde: $ESUN_\lambda$ é a irradiância solar exo-atmosférica média para cada banda ($W / m^2 / \mu m$).

3.4.1.5 Radiação de onda longa de entrada ($R_{s\downarrow}$)

Pode ser compreendida como a chegada do fluxo de radiação solar direta que realmente atinge a terra (W/m^2).

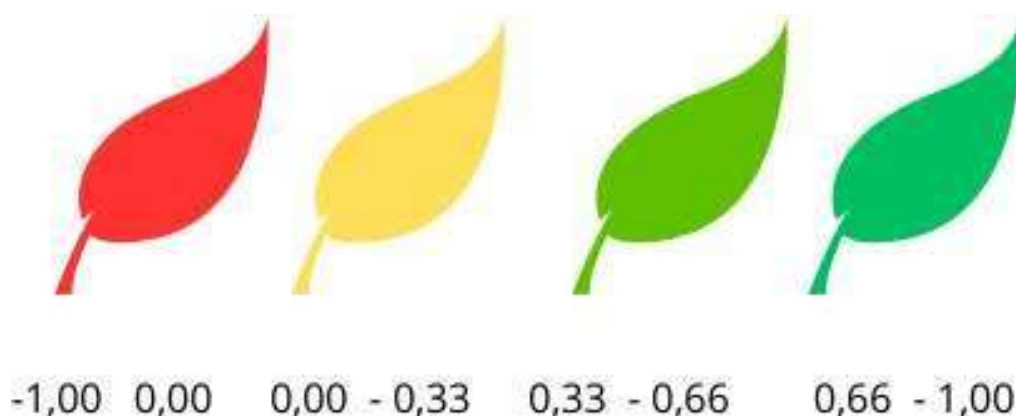
$$R_{s\downarrow} = G_{sc} * \cos \theta * d_r * t_{sw}$$

Onde: G_{sc} é a constante solar ($1367 W / m^2$), $\cos \theta$ é o cosseno da incidência solar ângulo como na etapa 2 acima, d_r é o inverso ao quadrado da distância relativa terra-sol, e t_{sw} é a transmissividade atmosférica. Esse cálculo é feito com uma planilha ou calculadora. Os valores para $R_{s\downarrow}$ podem variar de $200 - 1000 W / m^2$, dependendo do tempo e localização da imagem.

3.4.1.6 Radiação de onda longa de saída ($R_{L\uparrow}$)

A radiação de onda longa de saída pode ser definida como o fluxo de radiação térmica emitida pela terra para a atmosfera. Normalmente é calculada utilizando índices tais como, NDVI, SAVI e LAI.

Figura 5 – Coloração das folhas para o índice de vegetação NDVI



Fonte: Falker (2017).

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

Onde: NIR = Infravermelho próximo e RED= Banda na cor vermelha.

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$$

Onde: NIR = Infravermelho próximo, RED= Banda na cor vermelha e L é um valor de 0,5.

$$LAI = \frac{(\ln \frac{0,69 - SAVI_{Id}}{0,59})}{0,91}$$

Onde; SAVI ID é o SAVI para o sul de Idaho calculado a partir do valor de SAVI e usando um valor de 0,1 para L. O valor máximo para LAI é 6,0, que corresponde a um máximo SAVI de 0,687. Além de SAVI = 0,687, o valor de SAVI "satura" com o aumento de LAI e não muda significativamente.

3.4.2 Emissividade da superfície (ε)

A emissividade da superfície pode ser definida como a razão da energia térmica irradiada por um corpo negro de mesma temperatura. Esse valor foi calculado a partir das seguintes equações:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 LAI; \text{ quando } LAI < 3$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 LAI; \text{ quando } LAI < 3$$

$$\varepsilon_{NB} = 0,98 \text{ e } \varepsilon = 0,98; \text{ quando } LAI \geq 3$$

3.4.3 Radiância térmica corrigida da superfície (R_c)

$$R_c = \frac{(L_6 - R)}{(t_{NB})} - (1 - \varepsilon_{NB}) * R_{sky}$$

Onde: L_6 é a Radiância espectral da banda 6 do modelo F01 ($W / m^2 / sr / \mu m$), R_p é a Radiância do caminho na banda de 10,4 - 12,5 μm ($W / m^2 / sr / \mu m$), R_{sky} é a banda estreita radiação térmica descendente para um céu claro ($W / m^2 / sr / \mu m$), e τ_{NB} é a banda estreita transmissividade do ar (10,4 -12,5 μm). Unidades para R_c são $W / m^2 / SR / \mu m$.

$$R_{sky} = (1,807 * 10^{-10}) T_a^4 (1 - 0,26 \exp(-7,77 * 10^{-4} (273,15 - T_a)^2))$$

Onde: T_a é a temperatura do ar próximo à superfície no momento da imagem.

3.4.4 Radiação de onda curta de saída ($R_L \uparrow$)

$$R_{L \uparrow} = \varepsilon_0 * \sigma * T_s^4$$

Onde: ε_0 é a emissividade da superfície de "banda larga" (adimensional), σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

3.4.5 Radiação de onda curta de entrada ($R_L \downarrow$)

Pode ser definida como o fluxo de radiação térmica descendente da atmosfera (W/m^2). É obtida através da equação:

$$R_{L \downarrow} = \varepsilon_a * \sigma * T_a^4$$

Onde ε_a é a emissividade atmosférica (adimensional) σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

3.4.6 Fluxo de calor do solo (G)

O fluxo de calor do solo pode ser definido como a taxa de armazenamento de calor no solo e na vegetação, devido ao processo de condução. Essa variável foi obtida através da equação descrita abaixo:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{(T_s)}{(\alpha(0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2))} * (1 - 98 * NDVI)$$

Onde: T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$), α é o albedo da superfície e NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada, G é então facilmente calculada multiplicando G/R_n .

3.4.7 Fluxo de calor sensível (H)

Pode ser definido como a taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução, devido a uma diferença de temperatura. Foi obtido através da fórmula:

$$H = \frac{(p * c_p * dT)}{(r_{ah})}$$

Onde: p é a densidade do ar (kg/m^3), c_p é o calor específico do ar ($1004 \text{ J/kg/}^{\circ}\text{K}$), dT ($^{\circ}\text{K}$) é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s/m).

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) foi calculada para estabilidade neutra, a partir da equação:

$$r_{ah} = \frac{(\ln * \frac{z_2}{z_1})}{u * k}$$

Onde: z_1 e z_2 são as alturas em metros acima do deslocamento do plano zero (d) da vegetação, u^* é a velocidade de atrito (m/s) que quantifica as flutuações de velocidade turbulenta no ar, k é a constante de von Karman (0,41). A velocidade de atrito pode ser calculada a partir da equação:

$$u^* = k u_x / \frac{(z_x)}{z_{om}}$$

Onde: k é a constante de von Karman, u_x é a velocidade do vento (m/s) na altura z_x e z_{om} é o comprimento da rugosidade do momento (m).

3.4.8 Velocidade do vento

A velocidade do vento em uma altura acima da estação meteorológica, na qual não se assume que há rugosidade.

$$u_{200} = u * \ln * \frac{(200)}{zom} * k$$

Onde: u^* é a velocidade de atrito na estação meteorológica.

3.4.9 Velocidade de atrito (u^*) para cada pixel.

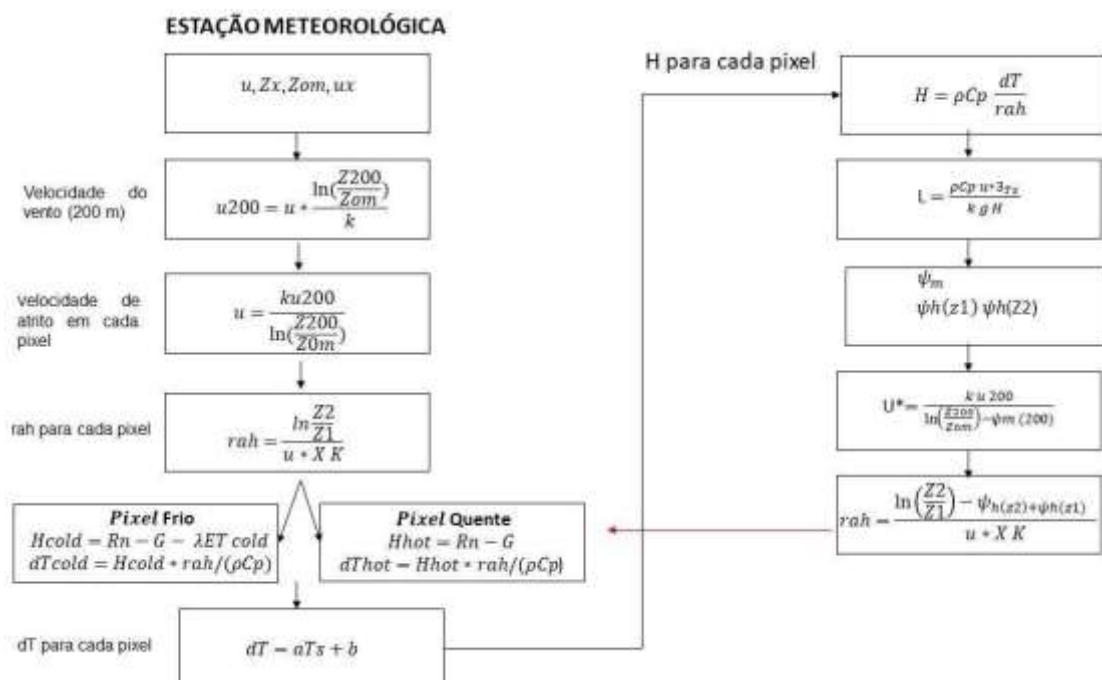
Calcula a velocidade de atrito em cada pixel.

$$u^* = k u * \ln * \frac{(200)}{zom}$$

Onde: zom é o comprimento de rugosidade do momento específico para cada pixel.

O processo a seguir utiliza um processo iterativo (Figura 5) para a determinação do calor sensível (H).

Figura 6 – Fluxograma do processo iterativo para o cálculo do calor sensível (H)



Fonte: Adaptado Ralf Water (2002), manual de SEBAL.

3.4.10 Fluxo de calor latente (LET)

O fluxo de calor latente (LET) pode ser compreendido como a taxa de perda de calor da superfície devido à ET.

$$LET = Rn - G - H$$

Onde: λ LET é um valor instantâneo para o tempo de passagem do satélite (W/m²).

3.4.12. ET instantânea (ET inst)

$$ET_{inst} = 3600 * \frac{(\lambda E)}{\lambda}$$

ET inst. é o ET instantânea (mm/h), 3600 é a conversão de tempo de segundos em horas, e λ é o calor latente de vaporização ou calor absorvido quando um quilograma de água evapora (J/kg).

Para conversão da ET horário em ET diária foi calculado o ET frequência, conforme a equação abaixo:

$$ET_{of} = \frac{ET_{inst}}{ET_i}$$

$$ET_{day} = ET_{of} * ET_0$$

ET inst: ET instantânea (mm /h);

ET₀ i: Evapotranspiração horária calculado pelo método de Penman Monteith.

A validação dos dados foi feita a partir da análise dos resultados estimados pelo algoritmo em função dos dados observados pela torre de fluxo. O parâmetro utilizado para analisar a qualidade das estimativas foi baseado nos seguintes critérios: Coeficiente de determinação - R^2 , Raiz quadrada do erro médio - RMSE(%) e média absoluta dos resíduos - MAE (%) , bem como através da análise gráfica dos valores observados e estimados e distribuição dos resíduos (%) e média por cento do erro (%).

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1} (y_i - p_i)^2}$$

$$MAE = \sqrt{\sum_{i=1} |y_i - p_i|}$$

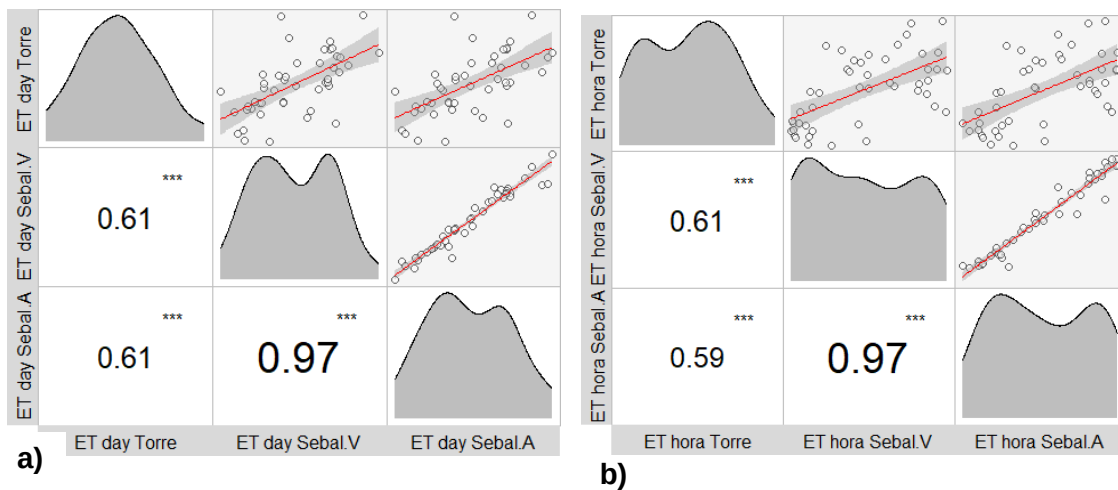
$$MAE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1} |y_i - p_i|}{yi * 100}}}{n}$$

Onde: RSS = Soma dos quadrados dos resíduos; TSS = Soma total dos quadrados; Σ = Somatória; $\bar{Y}_i$ = média dos valores observados (m); $\bar{Y}$ = estimados (m); $\bar{Y}_m$ = média dos valores estimados (m); S^2 = variância; n = número de observações; p = número de parâmetros dos modelos que acompanham as variáveis independentes.

4 RESULTADOS

Os valores observados indicam uma correlação moderada entre as ETs estimadas em função das ETs observadas, uma vez que o algoritmo de SEBAL com seleção de ambos os pixels (água e vegetação) apresentaram correção de 0,61 na estimativa diária, para a estimativa horária foi observado a correlação de 0,61 com seleção do pixel vegetação e 0,59 com uso do pixel água (Figura 6).

Figura 7 – Correlação entre a variável ET – observada na torre e ET estimada pelo método do algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels âncora vegetação e água



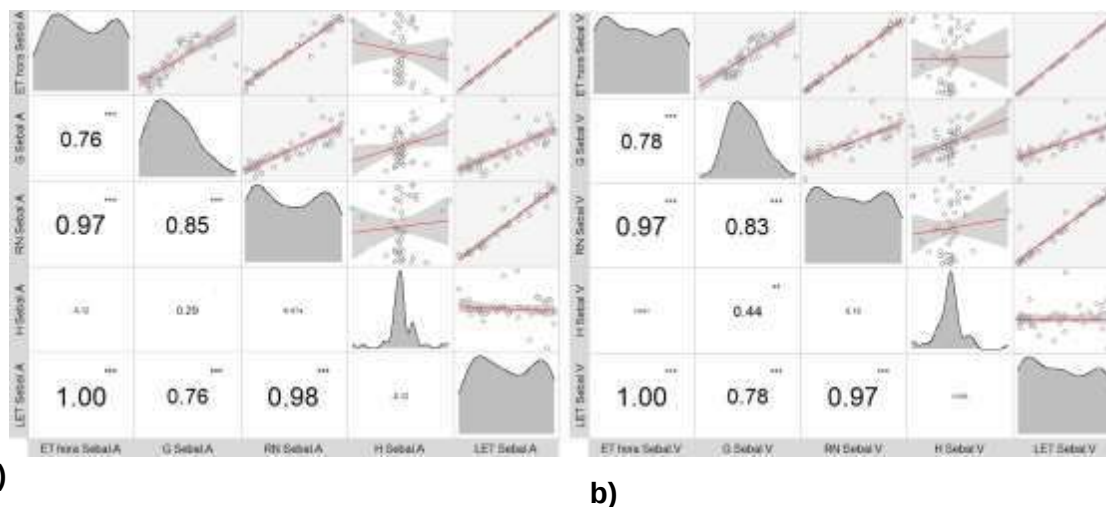
ET Torre = Evapotranspiração observada na torre, ET SEBAL V = Evapotranspiração estimada no modelo de SEBAL na seleção do pixel âncora vegetação, ET SEBAL A = Evapotranspiração estimada no modelo de SEBAL na seleção do pixel âncora água.

Os resultados indicam uma menor dispersão dos valores observados pela torrena ET diária, uma vez que as médias se situam no centro da curva. Nas demais estimativas é observado uma maior dispersão dos dados.

Os valores observados na variável LET e RN indicam uma correlação muito forte em função da variável ET SEBAL, sendo esse mesmo comportamento visto na seleção com pixel vegetação e pixel água. Para a variável G foi observado uma forte correção em função da variável ET SEBAL, sendo observado uma correlação levemente maior no uso do pixel vegetação. Na variável H em função da ET SEBAL foi identificado uma baixa correlação.

Nas relações entre as demais variáveis foi observado uma alta correlação entre as variáveis G, RN e LET com exceção da variável H, o qual apresentou baixa correlação em função de todas as variáveis.

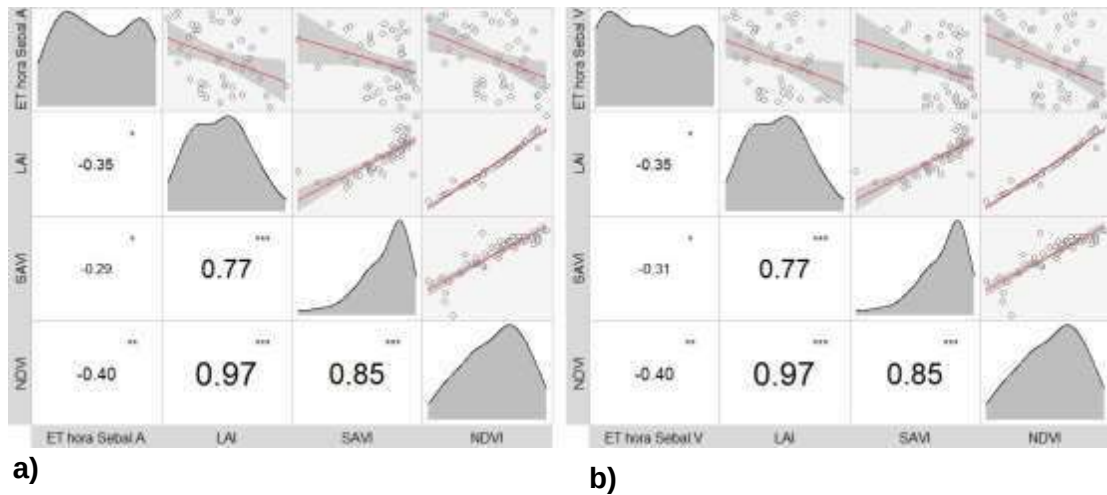
Figura 8 – Correlação entre a ET horária e as variáveis calor sensível (H), calor do solo (G), fluxo líquido de radiação na superfície (RN) e calor latente (LET) na seleção dos pixels âncora água (a) e vegetação (b)



G SEBAL = Fluxo do solo estimado no algoritmo de SEBAL; RN: Fluxo de radiação na superfície estimado no algoritmo de SEBAL; LET = Calor latente estimado no algoritmo de SEBAL; H = Calor sensível estimado no algoritmo de SEBAL; ET hora = Evapotranspiração horário estimado no algoritmo de SEBAL.

No que concerne aos índices de vegetação LAI, SAVI e NDVI foi indicado uma ausência de correlação em função da ET estimadas, não obstante as interações entre os índices de vegetação indicaram alta correlação entre as variáveis, sendo a maior correlação observada entre o SAVI e LAI, seguida das interações entre SAVI e NDVI e NDVI e LAI apresentado a menor interação entre as demais (moderada).

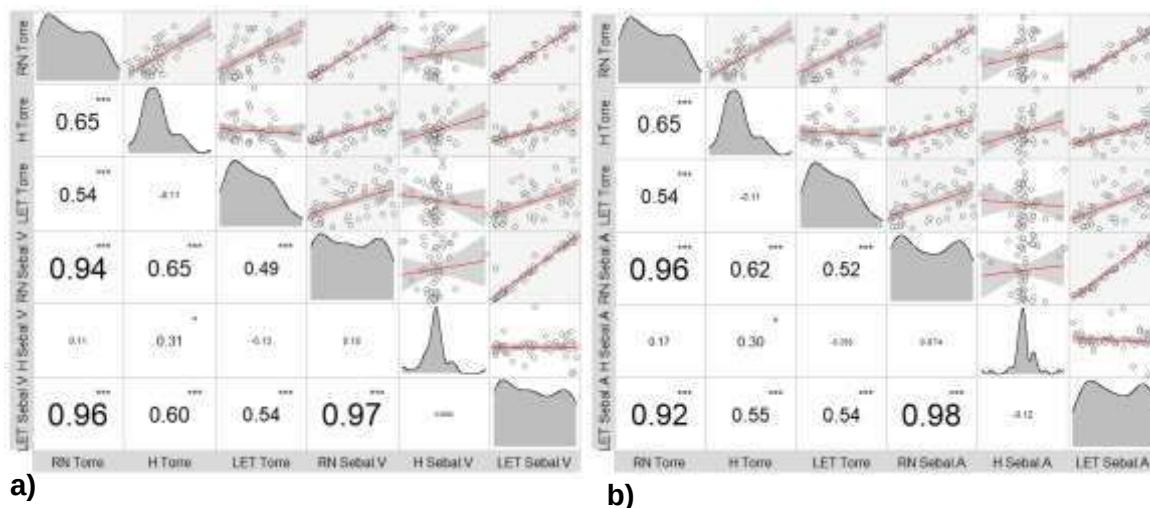
Figura 9 – Correlação entre a ET horária em função dos índices de vegetação e LAI na seleção dos pixels âncora água (a) e vegetação (b)



SAVI = Índice de vegetação ajustada ao solo, LAI = Índice de área foliar, NDVI = Índice de vegetação por diferença normalizada, ET hora = Evapotranspiração estimada no algoritmo de SEBAL.

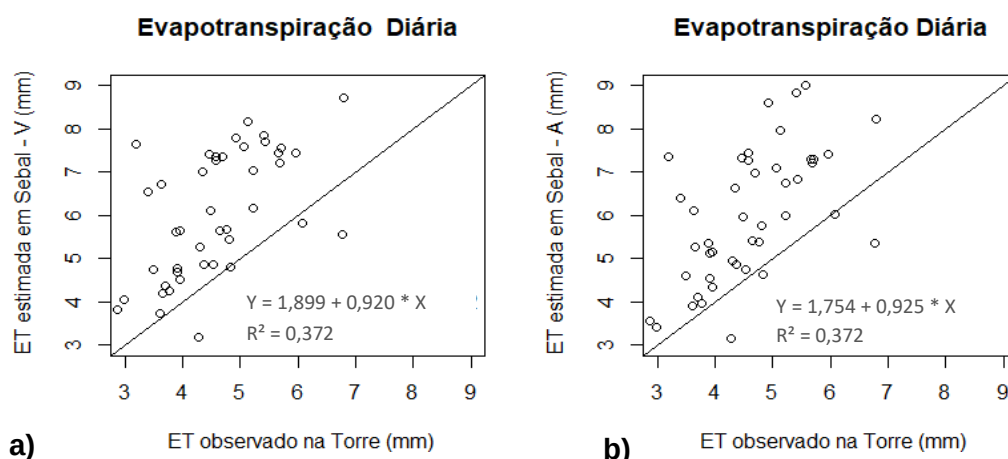
As correlações entre as variáveis RN, H e LET observadas na torre em função das estimadas pelo algoritmo de SEBAL indicam divergências nas correlações, uma vez que, foi observado uma forte correlação entre a variável RN estima e observada, uma correlação moderada entre as variáveis LET estima e observada e uma baixa correlação entre as variáveis H observada e estima. Esse mesmo comportamento foi visto tanto na seleção com o pixel âncora vegetação quanto pixel âncora água.

Figura 10 – Correlação entre as variáveis estimadas no algoritmo de SEBAL calor sensível (H), fluxo líquido de radiação na superfície (RN) e calor latente (LET) em função da observada pela torre na seleção dos pixels âncora água (a) e vegetação (b)



G SEBAL = Fluxo do solo estimado no algoritmo de SEBAL; RN: Fluxo de radiação na superfície estimado no algoritmo de SEBAL; LET = Calor latente estimado no algoritmo de SEBAL; H = Calor sensível estimado no algoritmo de SEBAL; ET hora = Evapotranspiração horário estimado no algoritmo de SEBAL

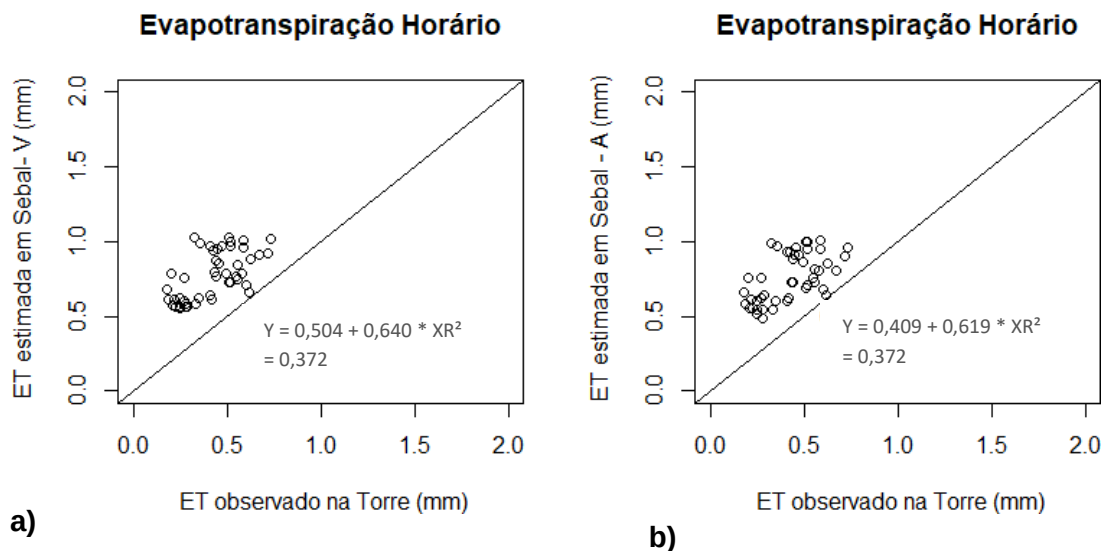
Figura 11 – Distribuição entre a variável ET observada na torre (diário) em função das variáveis ET estimada em SEBAL na seleção dos pixels âncora vegetação (a) e água (b)



ET Torre = Evapotranspiração observada na torre, ET SEBAL V = Evapotranspiração estimada no modelo de SEBAL na seleção do pixel âncora vegetação, ET SEBAL A = Evapotranspiração estimada no modelo de SEBAL na seleção do pixel âncora água.

A distribuição dos dados da ETs estimadas em relação a ET observada na torre demonstra uma correlação positiva, no entanto fraca, uma vez que os dados apresentam uma grande dispersão dos pontos, onde o algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels vegetação apresentou a maior dispersão em relação ao algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels água. Além disso, é possível identificar uma tendência em superestimar os dados estimados, com ênfase em 3 observações que apontados como possíveis outliers.

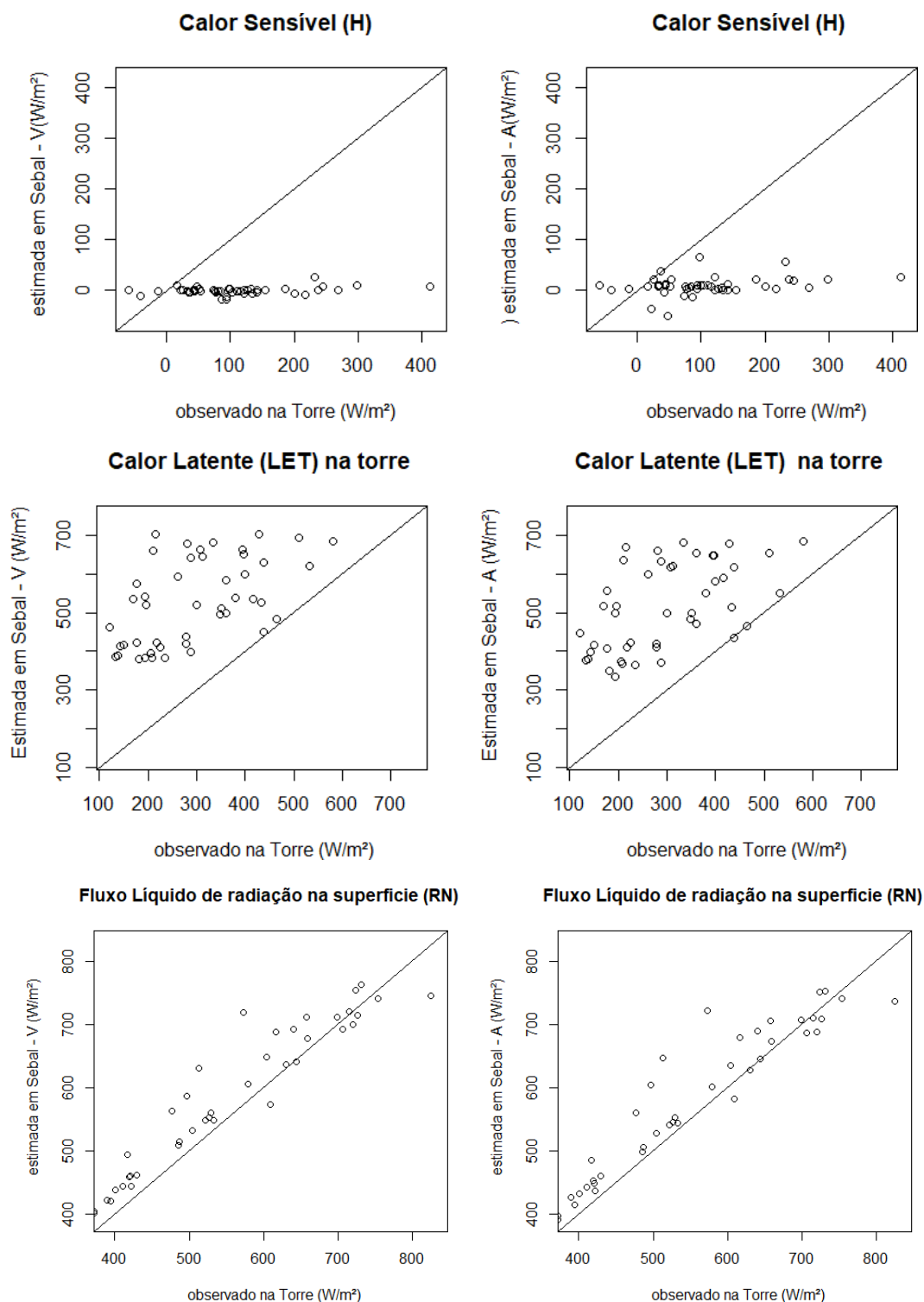
Figura 12 – Distribuição entre a variável ET observada na torre (horário) em função das variáveis ET estimada em SEBAL na seleção dos pixels âncora vegetação (a) e água (b)



ET Torre = Evapotranspiração observada na torre, ET SEBAL V = Evapotranspiração estimada no modelo de SEBAL na seleção do pixel âncora vegetação, ET SEBAL A = Evapotranspiração estimada no modelo de SEBAL na seleção do pixel âncora água

A distribuição dos dados da ETs estimadas em relação a ET observada na torre demonstra uma correlação positiva, no entanto fraca, uma vez que os dados apresentam uma grande dispersão dos pontos, onde o algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels vegetação apresentou a maior dispersão em relação ao algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels água. Além disso, é possível identificar uma tendência em superestimar os dados estimados, com ênfase em 3 observações que apontados como possíveis outliers.

Figura 13 – Distribuição entre as variáveis calor sensível (H), fluxo líquido de radiação na superfície (RN) e calor latente observado na torre e estimada em SEBAL na seleção dos pixels vegetação e pixel água



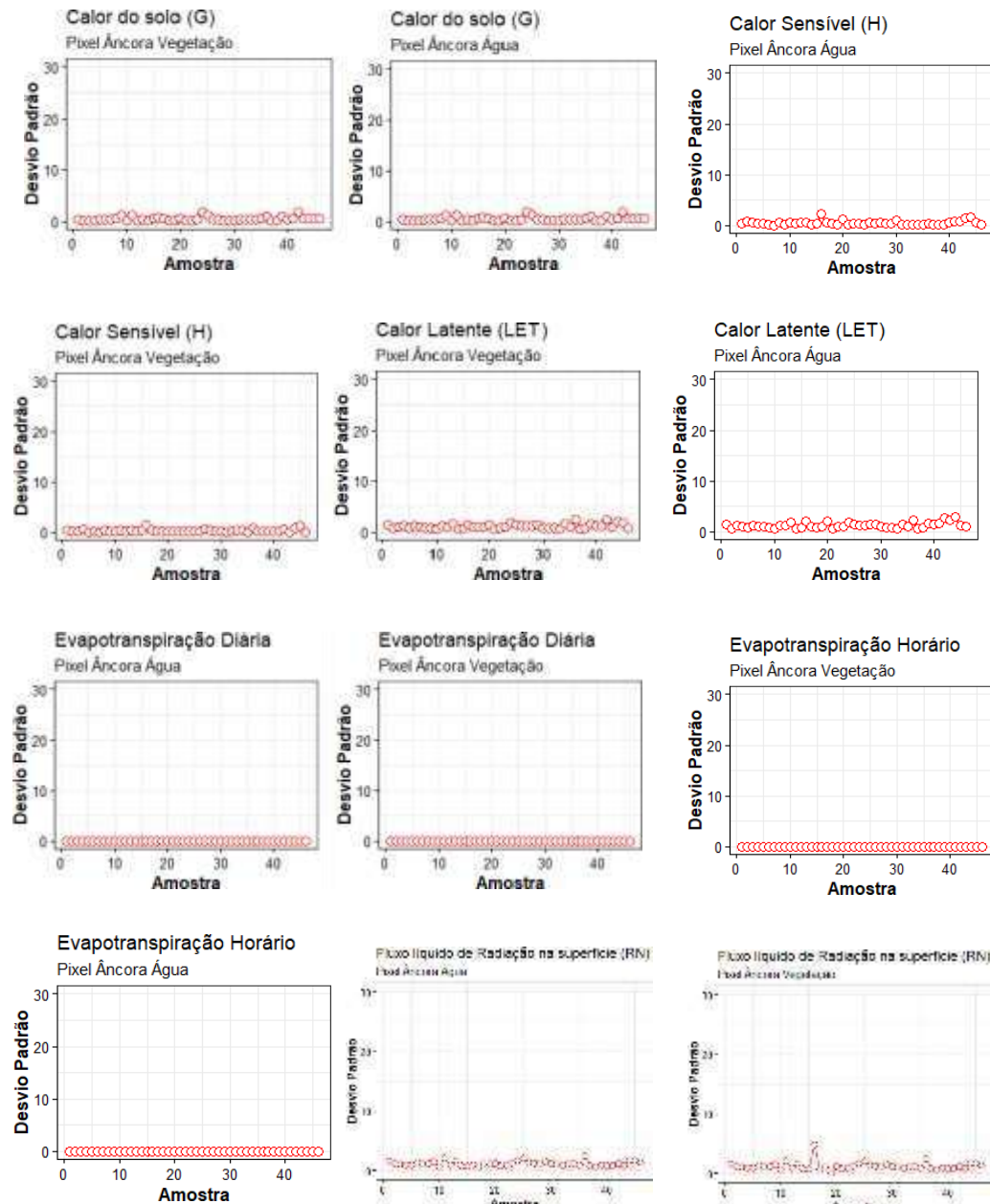
Os resultados obtidos para variável H indicam uma baixa dispersão dos dados e uma subestimação dos valores estimados, uma vez que, a média das estimativas

no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel âncora vegetação e água foi de $-0,61 \text{ W/m}^2$ e $10,07 \text{ W/m}^2$ respectivamente, para a média observada na torre $107,29 \text{ W/m}^2$.

Para a variável LET é observado um comportamento oposto as estimativas da variável H, onde os resultados estimados no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel âncora vegetação e água apresentaram uma maior dispersão dos dados e uma tendência em superestimar os resultados, sendo visto as médias de $520,75 \text{ W/m}^2$ e $499,28 \text{ W/m}^2$ respectivamente e para torre a média de $296,72 \text{ W/m}^2$.

Os valores estimados na variável RN indicam uma menor distribuição dos dados, visto que as estimativas se aproximaram dos dados observados, sendo obtido nas médias da RN estimados no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel âncora vegetação a valor de $576,33 \text{ W/m}^2$ e de $559,11 \text{ W/m}^2$ na seleção do pixel água, para os valores observados na torre foi visto a média de $532,33 \text{ W/m}^2$.

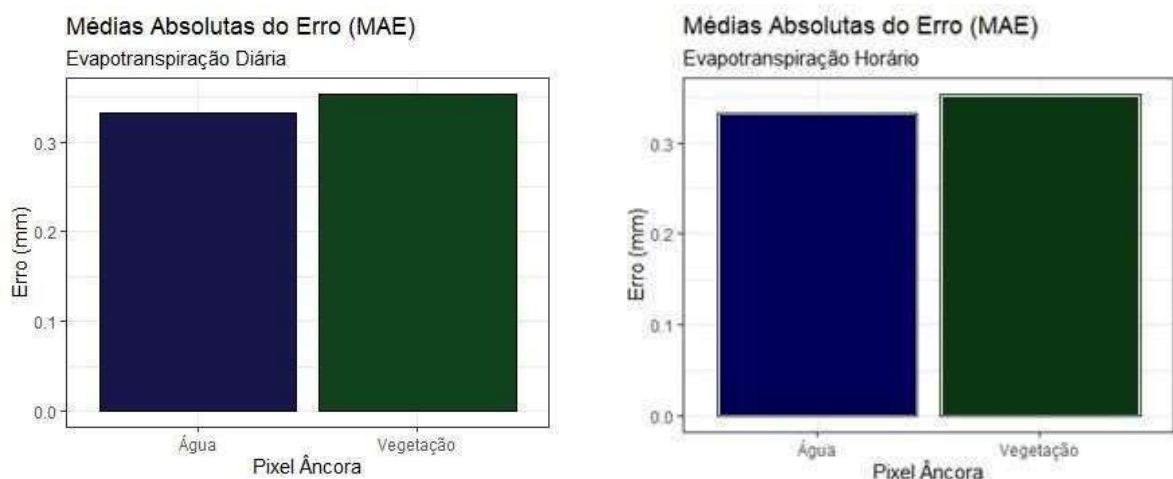
Figura 14 – Distribuição dos desvios padrão dos pixels para as variáveis calor sensível (H), fluxo líquido de radiação na superfície (RN) e calor latente (LET), calor do solo (G), e ET horário (Eti) estimadas em SEBAL na seleção dos pixels vegetação e água



Amostra: Datas das imagens avaliadas pelo algoritmo de SEBAL, ETi = Evapotranspiração horário estimado pelo algoritmo de SEBAL, RN: Fluxo de radiação na superfície estimado no algoritmo de SEBAL; LET = Calor latente estimado no algoritmo de SEBAL; H = Calor sensível estimado no algoritmo de SEBAL e G = Calor do solo estimado no algoritmo de SEBAL.

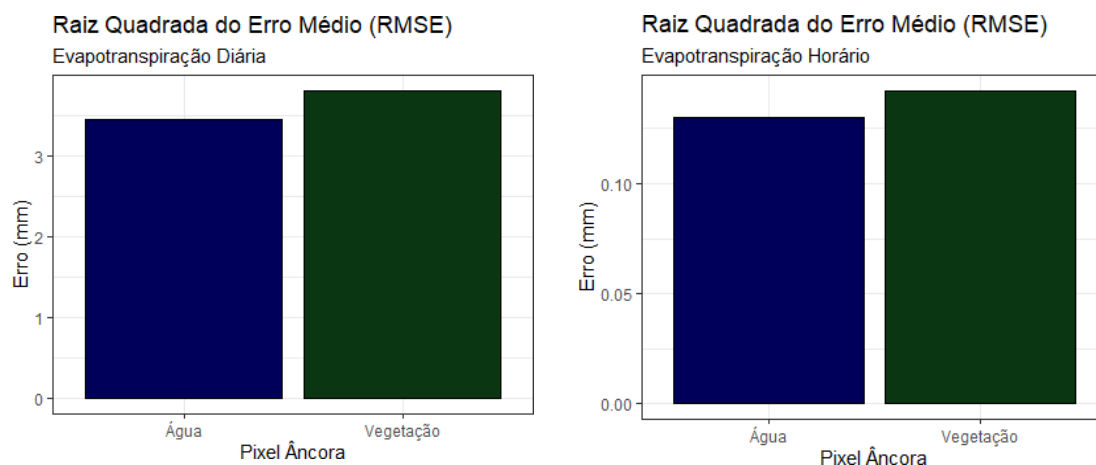
O desvio padrão observado nas estimativas das variáveis G, H, RN, LET, ET horária pelo algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels vegetação e água indicam uma baixa variação entre as estimativas, uma vez que as médias dos desvios observados foram de 0,535 (G), 1,277 (RN), 0,358 (H), 1,243 (LET), 0,0001 (ETi) na seleção do pixel vegetação e 0,579 (G), 1,223 (RN), 0,510 (H), 1,243 (LET), 0,015 (ETi) na seleção do pixel água.

Figura 15 – Erro absoluto dos erros (MAE) pelo algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels vegetação e água em função da variável ET observada na torre



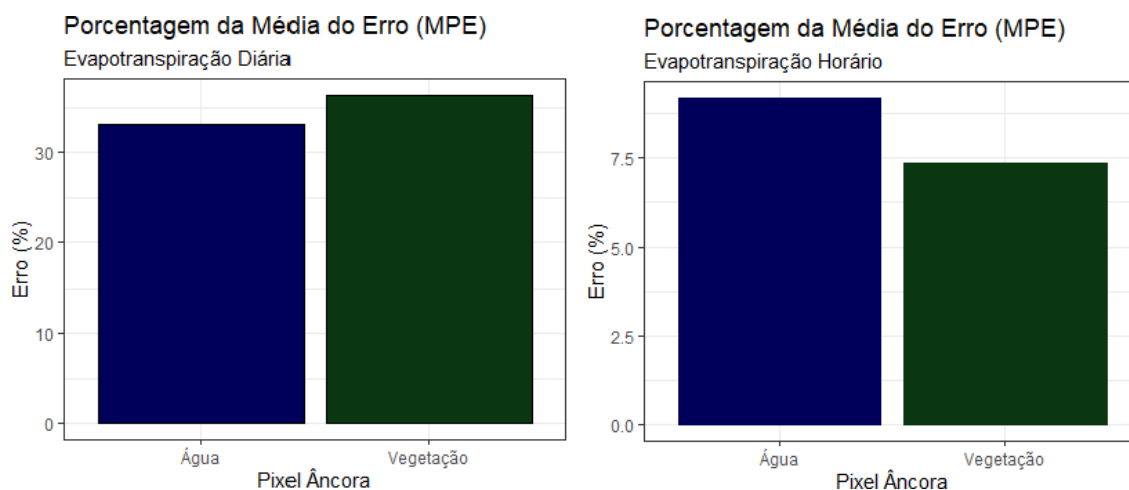
O MAE calculado na ET estimado em função da ET observada indicam menores erros com o uso algoritmo de SEBAL na seleção do pixel água, onde foram vistos valores de 0,333 mm na estimativa do ET horário e 1,521 mm na ET da diária, para as estimativas na seleção do pixel vegetação foram observados erros de 0,353 mm (diário) e 1,649 mm (horário).

Figura 16 – Raiz quadrática do erro médio (RMSE) pelo algoritmo de SEBAL – Pixel vegetação e pixel água em função da variável ET – observada



Para os valores de RMSE foram observados o erro médio de 0,361 mm na estimativa horário e 1,857 mm para a diária na seleção do pixel água. Com a seleção do pixel vegetação foi visto os valores de 0,377 mm na estimativa horário e 1,948 mm para estimativa diária.

Figura 17 – Erro percentual absoluto médio raiz (MAPE) pelo algoritmo de SEBAL na seleção dos pixels vegetação e pixel água em função da variável ET – observada



O resultado obtido pelo cálculo do MAPE expõe os valores das estimativas no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel água, sendo visto o valor de 33,31 % para estimativa da ET horária e 33,04 % para a diária. Com a seleção do pixel vegetação foi observado valores de 0,377 % na predição da ET horário e 36,29 % para a diária.

Figura 18 – ET diária estimada no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel água para a área de estudo

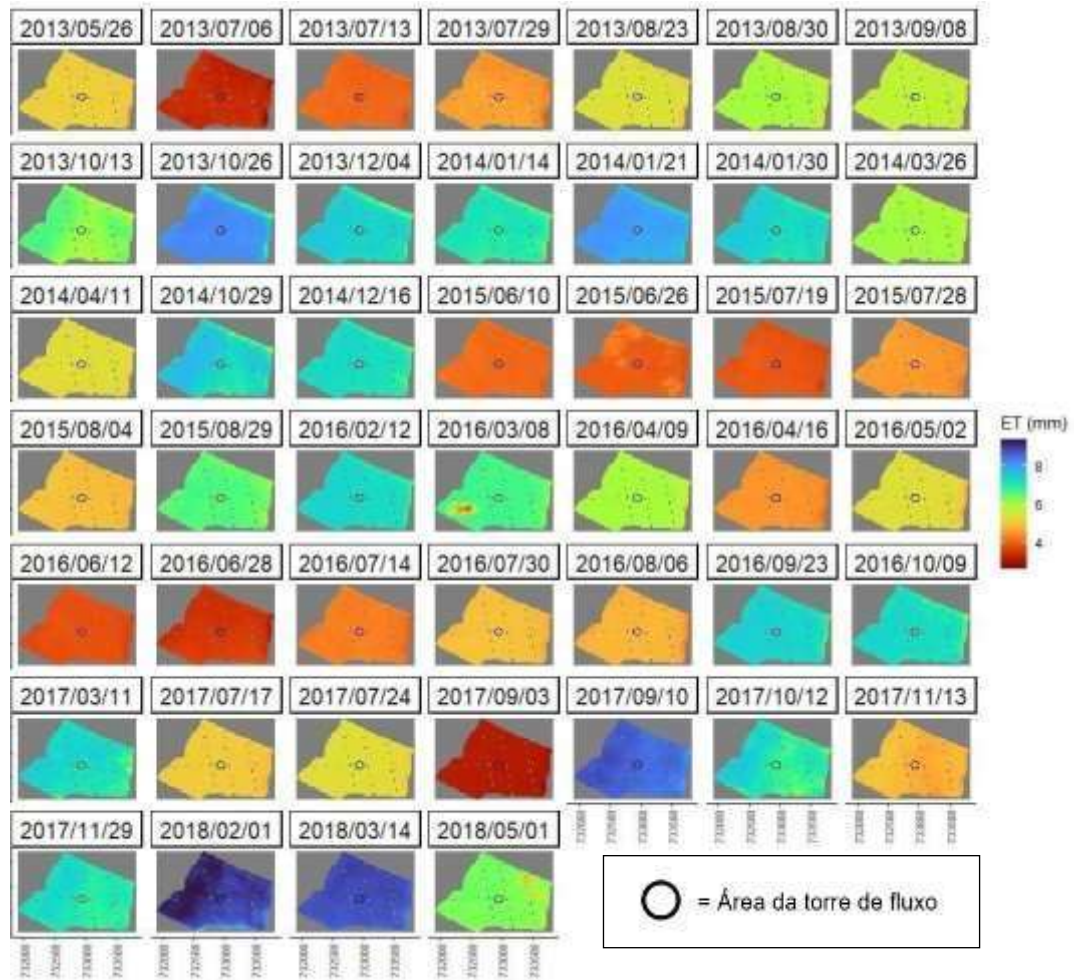


Figura 19 – ET horária estimada no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel água para a área de estudo

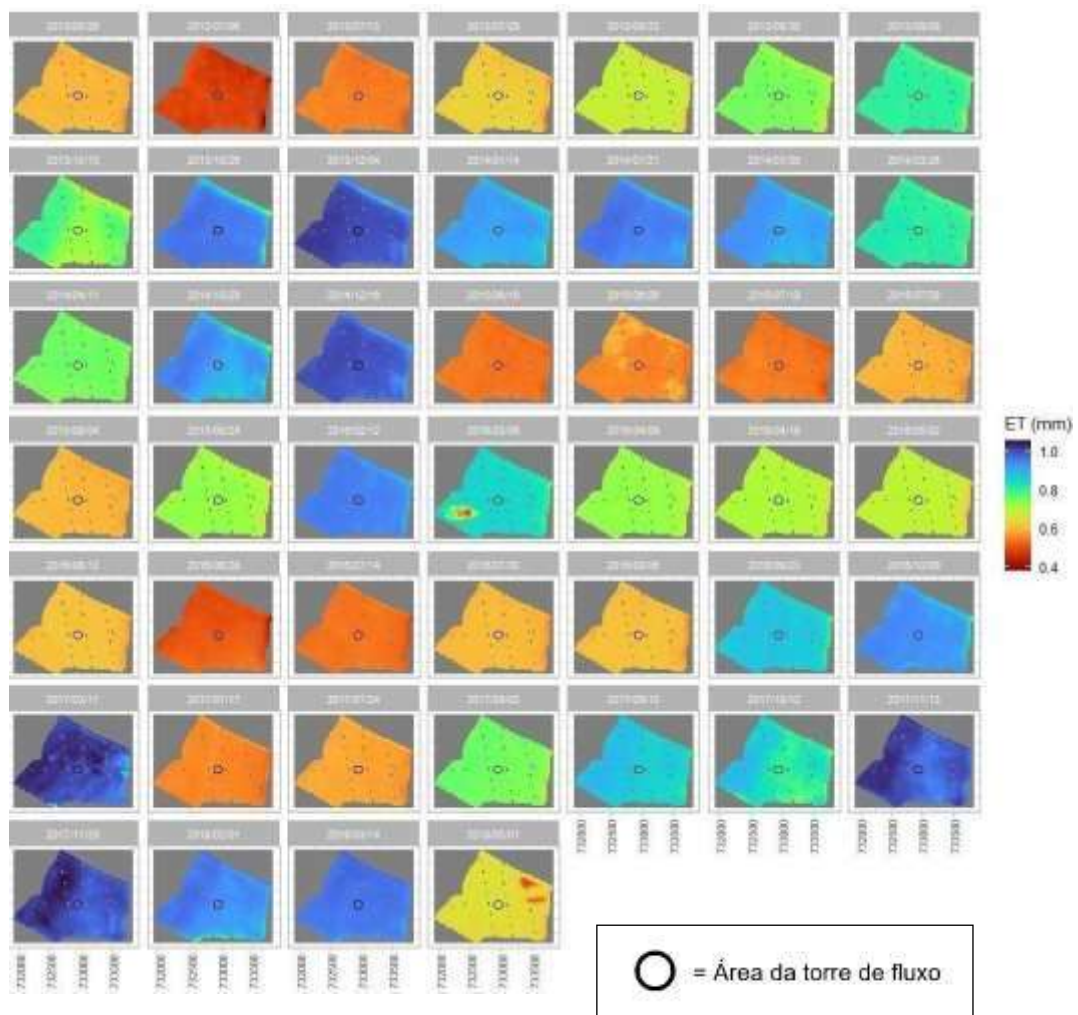
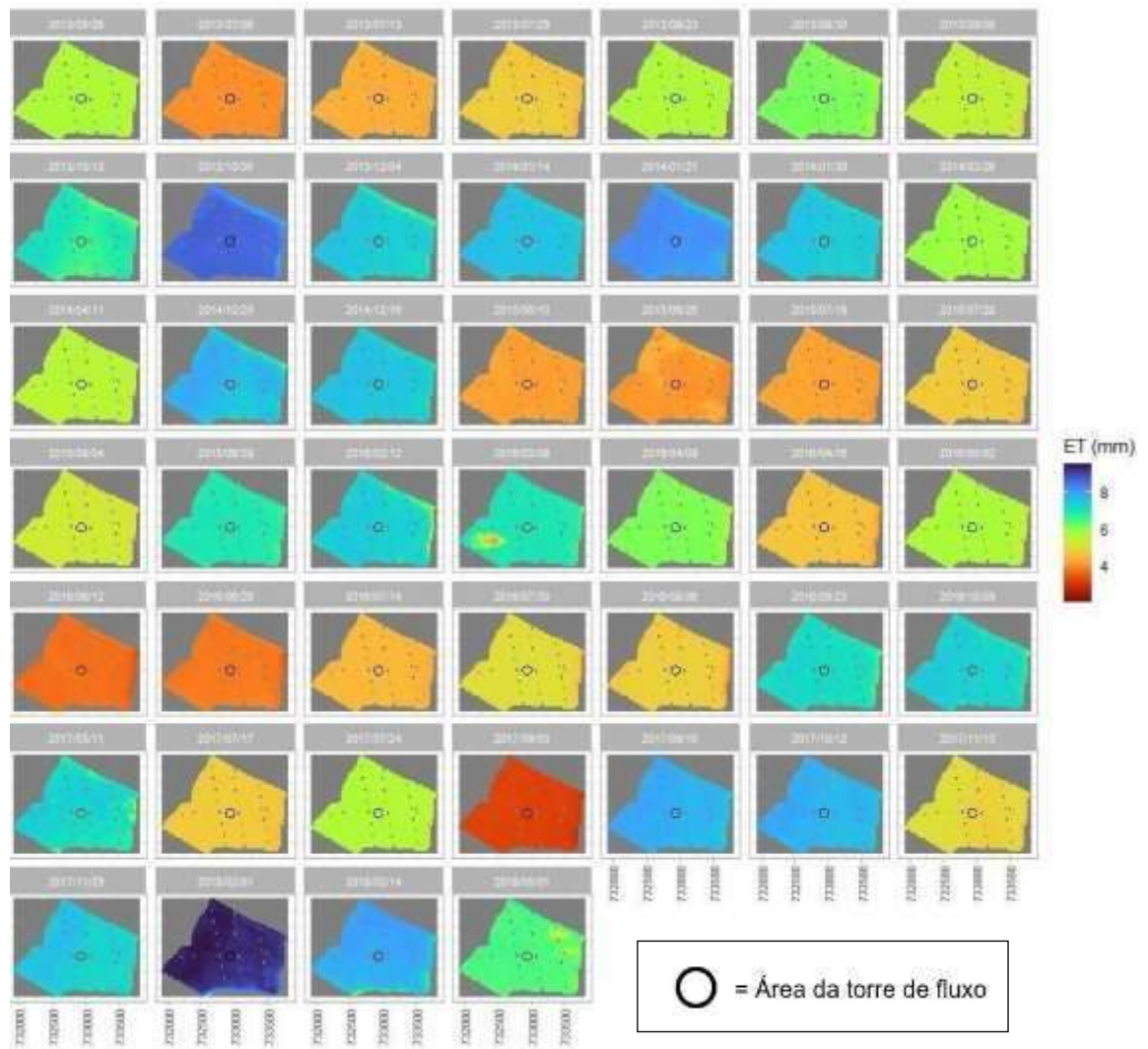
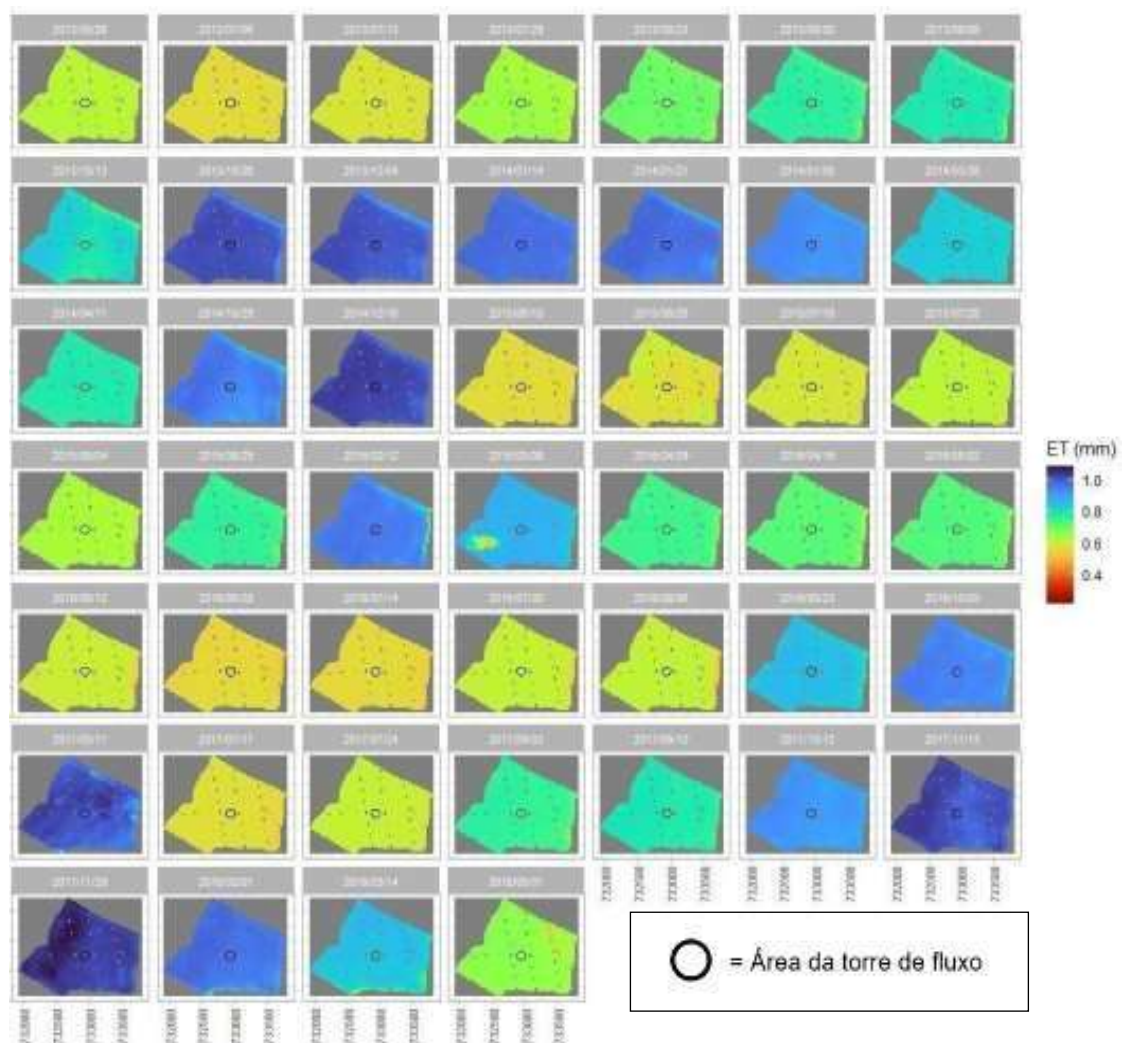


Figura 20 – ET diária estimada no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel vegetação para a área de estudo



**Figura 21 – ET horária estimada no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel
vegetação para a área de estudo**



5 DISCUSSÃO

Os resultados das correlações da ET estimada no algoritmo de SEBAL na seleção do pixel vegetação e água em função da ET observada na torre indicam uma correlação moderada e positiva (Figura 6), uma vez que os valores obtidos apresentam alta dispersão dos dados e uma tendência de superestimar os resultados (Figuras 10 e 11). Dentre os fatores que explicam o comportamento das estimativas é evidência da influência das variáveis que compõe o cálculo do balanço de energia, dentre eles as variáveis LET e RN os quais apresentam uma correlação muito forte e positiva na predição da ET, seguida pela variável G que apresenta forte e positiva correlação e H que não apresentou o mesmo comportamento, sendo visto uma ausência de correlação (Figura 8).

Nas correlações entre os índices de vegetação NDVI, SAVI e índice de área foliar (LAI) em função da ET estimada em SEBAL foi observado uma correlação nula e negativa (Figura 8), indicando baixa sensibilidade dos índices de vegetação na predição da ET. Outros autores afirmam a ausência de sensibilidade do NDVI na estimativa ET, principalmente em regiões com cobertura total do dossel, o qual representa a situação da área de estudo, devido a idade e o porte dos eucaliptos no local (WANG ET., AL 2009).

É abalizado a importância das variáveis citadas na predição da ET, o que caracteriza os resultados vistos nas estimativas, uma vez que, a variável H expõe valores bem abaixo aos observados pela torre (Figura 12), o qual implica na elevação da variável LET, que por sua vez influencia na característica de superestimação da ET pelo algoritmo de SEBAL, sendo assim a principal responsável por esse resultado. A variável H pode ser compreendida como a variável de maior importância no algoritmo de SEBAL, sendo extremamente sensível a escolha dos pixels âncoras e altamente afetada pela temperatura do ar e umidade, outro fator que influencia diretamente em sua predição é a resistência a aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) que ajustada por meio das características da superfície (KICH, 2018), variável essa de difícil precisão por meio de imagens orbitais, principalmente áreas com densa vegetação por longo períodos, caso esse observado na área de estudo.

Para a variável RN foi observado uma boa predição das estimativas, sendo a variável que mais se aproximou do resultado visto pela torre. Apesar da influência do

local sobre a predição da ET foi observado um baixo desvio entre os pixels nas variáveis que compõe o balanço de energia e na ET estimada (Figura 13).

Na seleção dos pixels âncoras no algoritmo de SEBAL é evidenciado que a seleção do pixel água apresentou melhores predições da ET em relação à seleção do pixel vegetação (Figura 14, 15 e 16), uma vez que, o uso do pixel vegetação apresentou menor acurácia e precisão, além de maior variação e influência do T_s que afeta diretamente as estimativas (LONG ET AL., 2011).

6 CONCLUSÕES

O algoritmo de SEBAL é capaz de realizar a estimativa da ET para a cultura do eucalipto, no entanto é visto que para uma melhor predição da variável é necessário realizar adaptações e ajustes nas equações do modelo, uma vez que o modelo utiliza o conceito do balanço de energia, deste modo o aumento ou redução dos valores estimados de uma determinada variável pode acarretar a superestimação ou subestimação da ET.

Assim, foi observado que o algoritmo de SEBAL demonstrou a característica de superestimação dos dados da ET para o cultivo do eucalipto. Sendo na seleção do pixel âncora frio (água) a melhor capacidade de estimação da ET em relação ao uso do pixel frio (vegetação), em especial na predição da ET horário na qual foi observado baixa acurácia e precisão no pixel vegetação.

Dentre as variáveis que compõe a equação do balanço de energia o RN foi a variável estimada que mais se aproximou dos dados observados, o oposto foi visto com a variável H, o que indica a baixa capacidade de estimar a variável pelo algoritmo de SEBAL.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Richard G. et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, v. 81, n. 1-2, p. 1-22, 2006.
- ALLEN, Richard G. et al. Automated calibration of the metric-landsat evapotranspiration process. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 563-576, 2013.
- ANDRADE, Ricardo Guimarães et al. Mapeamento de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração no Pantanal usando técnicas de sensoriamento remoto. 2009.
- BASTIAANSSEN, Wim GM et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of hydrology**, v. 212, p. 198-212, 1998.
- BASTIAANSSEN, Wim GM et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. **Journal of hydrology**, v. 212, p. 213-229, 1998.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. et al. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.
- BORATTO, IM de P.; GOMIDE, Reinaldo Lúcio. Espacialização dos componentes do balanço de energia e de evapotranspiração na região Norte de Minas Gerais, utilizando o modelo SEBAL e imagens orbitais Landsat 5 TM. In: **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p. 6284-6291., 2013.
- BRUSAERT, W Hydrology: An Introduction. Cambridge University Press. 605 páginas.2005.
- CAMARGO, ÂNGELO PAES DE; CAMARGO, MARCELO BENTO PAES DE. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial.**Bragantia**,v.59,p.125-137,2000.
- CUNHA, Ana Catarina Monteiro Carvalho Mori da et al. Relações entre variáveis climáticas com produção e enraizamento de miniestacas de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 33, p. 195-203, 2009.
- DA CUNHA, Fernando França; MAGALHÃES, Fernando Fagner; DE CASTRO, Marco Aurélio. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. **Revista Engenharia na Agricultura-Revang**, v. 21, n. 2, p. 159-172, 2013.
- FISHER, Joshua B. et al. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resources Research**, v. 53, n. 4, p.2618-2626, 2017.
- KICH, Elisa De Mello. Calibração automática do modelo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto (SEBAL). 2018.

LI, Zhao-Liang et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. **Sensors**, v. 9, n. 05, p. 3801-3853, 2009.

LONG, Di; SINGH, Vijay P.; LI, Zhao-Liang. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor?. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D21, 2011.

MENEZES, Sady Júnior Martins da Costa de et al. Estimation of energy balance components and evapotranspiration in eucalyptus crops using the SEBAL algorithm and Landsat 5 TM image. 2011.

PAULA, Adriano Cesar Pereira de. Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop. 2018.

PEREIRA, Antônio Roberto; NOVA, Nílson Augusto Villa; SEDIYAMA, Gilberto Chohaku. **Evapo (transpi) razão**. Piracicaba: Fealq, 1997.

PILAU, F. G.; MARIN, F. R. Agrometeorologia digital: as bases biofísicas para a revolução digital no campo. In: *TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas*, n.20 , jul./dez. 2019, p. 59-76.

REIS, Kelvin Andres. Estimativa de evapotranspiração pelo modelo SEBAL adaptado para cultura do trigo na região do Cerrado. 2019.

RUHOFF, Anderson L. et al. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 703-725, 2012.

REZENDE, Luciano Vilas Boas; CAMELLO, Thereza Cristina F.; REBELO, Lea Piumbim. O EUCALIPTO RESSECA O SOLO? MITO OU VERDADE? EUCALYPTUS TREES DRY OUT THE SOIL? MYTH OR TRUTH?

SANTOS, Leonardo Laipelt dos. geeSEBAL: uma ferramenta Google Earth Engine para estimativa de séries temporais de evapotranspiração. 2020.

SANTOS, Thiago Veloso dos; FONTANA, Denise Cybis; ALVES, Rita Cássia Marques. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 488- 496, 2010.

SCHIRMBECK, Juliano. Padrão espaço temporal dos componentes do balanço de energia em clima subtropical úmido. 2017.

SCHWIDER, Yan et al. Efeito do déficit hídrico sobre o crescimento de eucalipto em diferentes condições microclimáticas. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n. 16, 2013.

SOUZA, Wesley Gonçalves de et al. Modelagem da Evapotranspiração em Plantios de Eucalipto em fase inicial de desenvolvimento com cobertura parcial do solo. 2006.

SOUSA, Áurea. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: o que medem e em que situações devem ser utilizados?. **Correio dos Açores**, p. 19-19, 2019.

WATERS, R. et al. SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land. **Idaho implementation, Advance Training and Users Manual, Department of Water Resources: Boise, ID, USA**, 2002.

WEI, Zhongwang et al. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 6, p. 2792-2801, 2017.

WANG, J. et al. Sensitivity analysis of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Transactions of the ASABE**, v. 52, n. 3, p. 801-811, 2009.

ZHANG, Ke; KIMBALL, John S.; RUNNING, Steven W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 3, n. 6, p. 834-853, 2016.

ZHANG, Lu; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. **Water resources research**, v. 37, n. 3, p. 701-708, 2001.