



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Ricardo Rivelino Dantas Ramos

**APLICAÇÃO DO SIMPLE ALGORITHM FOR  
EVAPOTRANSPIRATION RETRIEVING (SAFER) PARA A CANA-DE-  
AÇÚCAR NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

JUAZEIRO – BA

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Ricardo Rivelino Dantas Ramos

**APLICAÇÃO DO SIMPLE ALGORITHM FOR  
EVAPOTRANSPIRATION RETRIEVING (SAFER) PARA A CANA-DE-  
AÇÚCAR NO SUBMÉDIO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UNIVASF, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Profa. Orientadora: Dra. Magna Soelma Beserra de Moura

Prof. Co-orientador: Dr. Thieres George Freire da Silva

JUAZEIRO – BA

2018


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Ricardo Rivelino Dantas Ramos

**APLICAÇÃO DO SIMPLE ALGORITHM FOR EVAPOTRANSPIRATION  
RETRIEVING (SAFER) PARA A CANA-DE-AÇÚCAR NO SUBMÉDIO DO VALE  
DO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco



---

Magna Soelma Beserra de Moura

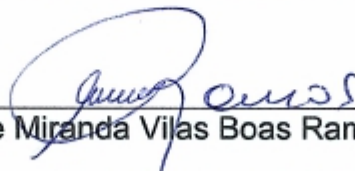
(Dra. Pesquisadora Embrapa Semiárido)



---

Aderson Soares de Andrade Junior

(Dr. Pesquisador Embrapa Meio-Norte)



---

Mário de Miranda Vilas Boas Ramos Leitão

(Dr. Professor Universidade Federal do Vale do São Francisco)

Juazeiro, 31 de julho de 2018.

	Ramos, Ricardo R. D.
R175a	Aplicação do Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER) para a cana-de-açúcar no submédio do Vale do São Francisco-Brasil / Ricardo Rivelino Dantas Ramos. – Juazeiro-BA, 2018.
	xii, 61f.: il.; 29 cm.
	Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro - BA, 2018.
	Orientadora: Dra. Magna Soelma Beserra de Moura. Co-orientador: Dr. Thieres George Freire da Silva
	1. Sensoriamento Remoto. 2. Meteorologia agrícola. 3. Evapotranspiração. 4. Cana de açúcar. I. Título. II. Moura, Magna Soelma Bezerra de. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco.
	CDD 551.572

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF  
Bibliotecária: Ana Paula Lopes da Silva CRB/3: 1269

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo dom da vida, pelo seu amor infinito e bondade.

Aos meus pais, Maria Candeis Dantas Ramos e Wilhame T. Ramos, pelo apoio, carinho e empenho.

À Dra. Magna Soelma Beserra de Moura pela oportunidade e acesso ao conhecimento, pela confiança e serenidade nos conselhos.

Aos Professores do PPGEA/UNIVASF, em especial ao Prof. Mário Miranda e ao Prof. Clóvis Ramos, pelo conhecimento compartilhado e pela inspiração.

Aos meus grandes AMIGOS... Todos se sintam abraçados e parte dessa conquista.

À UNIVASF pela oportunidade do mestrado, por de fato me sentir em casa.

À Embrapa Semiárido, pela concessão das instalações, equipamentos, transporte e pelo apoio financeiro essenciais à realização desta pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi aplicar e validar o *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) em imagens MODIS para determinação da evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. Para isso, selecionou-se uma área comercial de cana-de-açúcar na Usina Agrovale, em Juazeiro, BA: Canavial Campo Britânica (Britânica), no qual havia dados de campo da ET<sub>r</sub>. Foram utilizadas imagens de satélite da safra de cana-de-açúcar de 2015-2016. Os valores da ET<sub>r</sub> foram determinados por meio do algoritmo SAFER e validados com parâmetros de campo obtidos em sensores instalados em uma torre micrometeorológica. Os dados de entrada para a modelagem da ET<sub>r</sub> com o SAFER foram: albedo da superfície ( $\alpha_s$ ), temperatura da superfície ( $T_s$ ) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Observou-se que a aplicação do SAFER não apresentou boas estimativas da ET<sub>r</sub> para a cana-de-açúcar. Entretanto, os parâmetros do balanço de radiação, albedo e temperatura do ar obtidos por meio de imagens de satélite apresentaram correlações significativas para o ciclo da cultura quando comparados com dados de campo. Verificou-se que na modelagem do  $\alpha_s$  não ocorreram variações acima de 2% entre as datas das imagens, com destaque e para o crescimento gradativo entre o início da safra, representado pela data 04/07/2015 (albedo = 12,87%), e o início da colheita, representado pela data 08/05/2016 (albedo = 17,71%). Para o NDVI, observaram-se os intervalos de classe entre 0,37 e 0,50 para períodos iniciais da safra e de 0,70 a 0,80 para período vegetativo. Já para a temperatura da superfície ( $T_s$ ) foram computados valores máximos entre setembro e dezembro de 2015 (06/09/2015 a 19/12/2015), que foram superiores a 34°C no canavial em estudo. Os valores da ET<sub>r</sub> estimados pelo modelo SAFER (ET<sub>r</sub><sub>SAFER</sub>) variaram entre 3,00 e 5,00 mm dia<sup>-1</sup> no período de crescimento máximo e maturação (09/01/2016 a 30/04/2016). Esses valores quando comparados com valores de ET<sub>r</sub> mensurados em campo com a torre micrometeorológica (ET<sub>r</sub><sub>TORRE</sub>) apresentaram elevada dispersão, não apresentando significância entre os dados ao nível de 5% de probabilidade; e com baixa correlação ( $r = 0,16$ ). Por fim, o algoritmo SAFER subestimou os valores de ET<sub>r</sub> da cana-de-açúcar irrigada, causando déficit para a evapotranspiração real da cultura se usado para manejo de água em campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sensoriamento Remoto; Evapotranspiração; Modelagem.

## ABSTRACT

This work aimed to apply and validate the Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving (SAFER) in MODIS images to obtain the actual evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) of irrigated sugarcane in the Submedio of the San Francisco River Valley. For this, a commercial area of sugarcane was selected at the Agrovale Corporation in Juazeiro, BA: Britânica Sugarcane Field (Britânica), in which there were field data for ET<sub>r</sub>. Satellite images of the sugarcane productive growth of 2015-2016 were used. The ET<sub>r</sub> values were determined using the SAFER algorithm and validated with field parameters obtained in a micrometeorological tower. The input data for the ET<sub>r</sub> modeling with SAFER were: surface albedo ( $\alpha_s$ ), surface temperature (T<sub>s</sub>) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). It was observed that the SAFER did not present good estimates for the sugarcane ET<sub>r</sub>. However, the radiation balance components, albedo, and surface temperature from MODIS satellite images presented significant correlation to the field data during the growth productive cycle studied. It was verified that in the modeling of  $\alpha_s$ , there were no variations above 2% between the dates of the images, especially for the initial period of growth, represented by the date 04/07/2015 (albedo = 12.87%), and for the before harvest period, represented by the date 08/05/2016 (albedo = 17.71%). For the NDVI, class intervals were observed between 0.37 and 0.50 for initial periods of growth season, and around 0.70 - 0.80 for vegetative period. The highest temperature values were recorded between September and December 2015 (06/09/2015 to 12/19/2015), which were higher than 34 °C in the studied sugarcane plot. The ET<sub>r</sub> values estimated by the SAFER model (ET<sub>r</sub><sub>SAFER</sub>) ranged from 3.00 to 5.00 mm day<sup>-1</sup> for the maximum growth period (09/01/2016 to 04/30/2016). Comparing to ET<sub>r</sub> values obtained in the field with the micrometeorological data from the tower (ET<sub>r</sub><sub>TORRE</sub>), it was observed high dispersion, with no significance for 5% probability; and, low correlation ( $r = 0.16$ ). Finally, the SAFER algorithm underestimated the ET<sub>r</sub> values, causing deficit for the actual evapotranspiration of the crop if used to field water management.

**KEYWORDS:** Remote sensing; Evapotranspiration; Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Área de estudo com destaque para localização do canal selecionado para modelagem da evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale São Francisco. ....22
- Figura 2** - Fluxograma para aplicação do modelo SAFER na obtenção da evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) de áreas com cana-de-açúcar com imagens MODIS. 27
- Figura 3** - Correlação entre o albedo medido na torre e obtido nas imagens MODIS para a cana-de-açúcar irrigada, safra 2015-2016, no Submédio do Vale São Francisco.....35
- Figura 4** - Albedo da superfície (%) em canais irrigados obtidos a partir de imagens do satélite MODIS no Submédio do Vale São Francisco.....38
- Figura 5** - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) em canais irrigados obtidos a partir de imagens do satélite MODIS no Submédio do Vale São Francisco. ....43
- Figura 6** - Correlação da temperatura da superfície (a), saldo de radiação (b), radiação emitida pela superfície (c) e atmosfera (d), e radiação refletida (e) entre dados modelados com o MODIS e medidos na torre micrometeorológica para o canal irrigado no Submédio do Vale São Francisco. ....46
- Figura 7** - Evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>, mm dia<sup>-1</sup>) no canal Britânica a partir de imagens do satélite MODIS e modelo SAFER (ET<sub>r</sub> SAFER) em comparação com ET<sub>r</sub> obtida em campo por meio de Torres Micrometeorológicas (ET<sub>r</sub> TORRE) no município de Juazeiro, BA situado no Submédio do Vale São Francisco. ....49



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Caracterização do canavial comercial de cana-de-açúcar selecionado para os estudos de validação da evapotranspiração real da cana-de-açúcar obtida por sensoriamento remoto e dados micrometeorológicos na Usina Agrovale S.A., em Juazeiro, BA. ....	23
<b>Tabela 2</b> - Dados dos produtos MODIS (MOD09Q1 e MOD1A2) utilizados para obtenção da reflectância e evapotranspiração. ....	25
<b>Tabela 3</b> - Dados climáticos mensais durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, em Juazeiro, BA. ....	33
<b>Tabela 4</b> - Albedo para canaviais irrigados no Submédio do Vale São Francisco, modelado a partir de imagens do satélite MODIS (MOD09Q1). ....	34
<b>Tabela 5</b> - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para canaviais irrigados no Submédio do Vale São Francisco, modelado a partir de imagens do satélite MODIS (MOD09Q1). ....	40
<b>Tabela 6</b> - Temperatura da superfície (°C) para canaviais irrigados no Submédio do Vale do São Francisco, modelado a partir de imagens do satélite MODIS. ....	44
<b>Tabela 7</b> - Evapotranspiração real (ET <sub>r</sub> ) para canavial irrigado modelado a partir de imagens MODIS e algoritmo SAFER no Submédio do Vale São Francisco. ....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land  
METRIC - Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration  
SAFER - Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving  
ETr - Evapotranspiração Real  
SR - Sensoriamento Remoto  
NASA - National Aeronautics and Space Administration  
NDVI - Normalized Difference Vegetation Index  
ET - Evapotranspiração  
T - Transpiração  
ETp - Evapotranspiração potencial  
ET0 - Evapotranspiração de referência  
H - Calor sensível  
Rn - Saldo de radiação  
G - Fluxo de Calor no Solo  
H - Fluxo de calor sensível  
LE - Calor latente  
BERB - Balanço de Energia pela Razão de Bowen  
 $R_s$  - Radiação de ondas curtas incidente por pixel  
 $r_0$  - Albedo corrigido pixel a pixel  
 $R_L$  - Radiação de ondas longas incidente por pixel  
 $\epsilon_0$  - Emissividade dos pixels das imagens de satélite  
Rg - Radiação Global  
Ta - Temperatura média do ar  
P - Precipitação pluviométrica  
T - Temperatura  
Ts - Temperatura do ar em bulbo seco  
Tu - Temperatura do ar em bulbo seco  
UR - Umidade relativa  
RB - Razão de Bowen  
 $\Delta t$  - Variação da temperatura do ar

$\Delta e$  - Variação da pressão de vapor

$L_\lambda$  - Radiância espectral

$DN_{Bi}$  - Número digital das bandas hiperespectrais

$RE_{Bi}$  - Fator multiplicativo de redimensionamento das bandas hiperespectrais

$A_{Bi}$  - Fator aditivo de redimensionamento das bandas hiperespectrais

$\rho_\lambda$  - Refletância espectral

$\beta$  - ângulo de elevação solar

$T_s$  - Temperatura da superfície

$\alpha_s$  - Albedo da superfície

$\omega_b$  - Ponderação da contribuição por banda espectral na recepção da refletância no sensor/satélite

$V_v$  - Velocidade do vento

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 Sensoriamento Remoto.....	15
2.2 Evapotranspiração .....	16
2.3 Modelo SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving).....	20
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
3.1 Localização, clima e solo.....	22
3.2 Aquisição e processamento das imagens de satélite.....	24
3.3 Evapotranspiração pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen .....	25
3.4 Aplicação do SAFER.....	27
3.5 Validação do SAFER para a cana-de-açúcar .....	30
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
4.1 Condições climáticas.....	32
4.2 Albedo.....	34
4.3 NDVI .....	39
4.4 Temperatura da superfície e componentes do balanço de radiação.....	44
4.5 Evapotranspiração real.....	47
4.6 Validação do SAFER para a cana-de-açúcar .....	48
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>51</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>61</b>
Anexo 1 - Parâmetros meteorológicos utilizados na modelagem do para as datas das imagens utilizadas na modelagem do SAFER.....	61

## 1. INTRODUÇÃO

No contexto da agricultura brasileira está inserida a cana-de-açúcar, matéria-prima para a fabricação do açúcar e do álcool, além de outros subprodutos, tendo colocado o país como líder mundial do setor, com produção de 633,26 milhões de toneladas na safra 2017/2018 (CONAB, 2018). Para alcançar elevados níveis de produtividade, a cana-de-açúcar tem passado por importantes ajustes no seu sistema de cultivo ao longo dos anos, principalmente com o lançamento de várias linhagens de híbridos no mercado nacional. Além disso, a tecnologia inserida no processo produtivo tem sido uma importante ferramenta para o planejamento dos tratamentos culturais, bem como no entendimento das sazonalidades das regiões produtoras de cana-de-açúcar no país.

A diversidade climática entre as regiões de cultivo no país força os produtores a inovarem em seus sistemas de produção em busca de maiores produtividades e menor abertura das fronteiras agrícolas. Dentre essas tecnologias destacam-se: irrigação, fertirrigação, nutrição mineral, adubação verde, uso de bactérias fixadoras de nitrogênio, rotação de culturas, dentre outras. Nesses aspectos destacam-se as áreas produtoras localizadas no Submédio do Vale do São Francisco, onde sob baixos volumes de precipitação, irregularmente distribuídos ao longo do ciclo de produção, e elevada demanda atmosférica, ocorre a reposição de água via irrigação durante todas as etapas de produção da cultura.

Associado ao uso dos dados de clima, tem se observado a adoção de novas ferramentas e técnicas que envolvem o sensoriamento remoto aplicado às áreas de cana-de-açúcar, como índices de vegetação oriundos de dados de refletância de sensores de dossel com comprimentos de onda específicos (AMARAL et al., 2018; ROSA et al., 2015), dentre outros. Em geral, isso tem permitido o monitoramento de áreas mais extensas e com maior repetibilidade temporal, atentando para as formulações técnicas e equacionamentos de constantes que favoreçam a veracidade de campo e a aplicabilidade de novas tecnologias.

Dentre as várias aplicabilidades, em regiões onde se realiza a reposição de água via irrigação, a determinação da evapotranspiração dos cultivos tem sido obtida utilizando-se imagens de sensores à bordo de satélites e algoritmos baseados em processos físicos, como o “Surface Energy Balance Algorithm for Land” – SEBAL

(BASTIAANSSEN, 1995), o “Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration” – METRIC (ALLEN et al., 2007) e o “Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving” – SAFER (TEIXEIRA et al., 2010). Este último foi desenvolvido e validado na região do Semiárido brasileiro, mais especificamente no Submédio do Vale do São Francisco, com o intuito de obter valores regionais da evapotranspiração real (ETr).

Segundo Teixeira et al. (2012) os métodos de balanço energético utilizando medições por satélites têm apresentado vantagens para frações de vegetação nativa e culturas agrícolas em diferentes estágios de desenvolvimento, não exigindo uma avaliação pontual das diferentes fases vegetacionais. No entanto, para algumas culturas cultivadas é necessária a avaliação desses métodos em condições extremas, que podem ser observadas durante as estações secas e chuvosas, e ainda para as diferentes fases de desenvolvimento dos cultivos.

O SAFER é um algoritmo que tem como vantagem o uso não obrigatório da banda termal e a possibilidade de aplicação com dados provenientes de diferentes tipos de estações agrometeorológicas (convencionais e automáticas). Essas características são importantes por possibilitar a avaliação das tendências históricas dos componentes do balanço de energia e da produtividade da água em larga escala ao longo dos anos, haja vista que sensores automáticos correspondem a avanços relativamente recentes na tecnologia instrumental (TEIXEIRA et al., 2014) e indisponíveis em muitos locais.

Embora tenha sido desenvolvido para a região do Submédio do Vale São Francisco, para a concepção do SAFER foram utilizados dados de campo oriundos de experimentos micrometeorológicos realizados em áreas nativas de caatinga e cultivos agrícolas irrigados de mangueira e videira (de vinho e de mesa). Assim, objetivou-se determinar e validar a evapotranspiração real (ETr) em áreas de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) irrigada no Submédio do Vale São Francisco, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e parâmetros obtidos em campo por meio de sensores instalados em torre micrometeorológica.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) é definido como sendo a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento e de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que compõem os alvos em suas diversas manifestações (NOVO, 2010).

O sensoriamento remoto tem papel significativo como uma das alternativas mais viáveis para extração de informações sobre os diversos usos do solo, gerando dados e possibilitando a programação de ações adequadas para tomada de decisões por constituir-se de ferramentas de articulação e informações geoespaciais (FUSHITA et al., 2013).

A partir do conhecimento das características físicas dos objetos de uma dada região e seu comportamento espectral (interação da radiação solar com os objetos que compõe o mosaico da superfície terrestre como os rios, a vegetação, o tipo de solo, a rocha, etc) é possível fazer o monitoramento das condições ambientais da área em questão e descobrir suas possíveis modificações (AMORIM et al., 2007).

O formato matricial das imagens facilita operações matemáticas e estatísticas para se analisar o grande número de dados que possuem as imagens dos sensores orbitais. Praticamente, todos os softwares especializados em processamento de imagens de sensoriamento remoto dividem as técnicas em dois tipos básicos: i) correção e ii) sistematização das imagens digitais. Não existindo um procedimento pré-definido que o usuário seja obrigado a seguir. Por exemplo, o usuário que deseja gerar um mapa temático necessitará de informações precisas da localização dos alvos que ele deseja investigar. Por isso, as correções das distorções geométricas da imagem são imprescindíveis. Em outros casos o usuário poderá extrair informações espectrais dos alvos em um banco de dados para identificar a natureza dos componentes terrestres, sendo obrigatória a realização das correções atmosféricas. Por fim, é possível aplicar uma classificação supervisionada, obtendo uma avaliação da distribuição das classes desses alvos. As técnicas de pré-processamento são, essencialmente, funções operacionais para remover ou corrigir

os erros e as distorções introduzidos nas imagens pelos sistemas sensores devido a erros instrumentais (ruídos espúrios), às interferências da atmosfera (erros radiométricos) e à geometria do imageamento (distorções geométricas). A ordem da correção da imagem depende dos objetivos almejados pelo intérprete, podendo iniciar pela correção radiométrica ou geométrica, ou todas serem realizadas (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Moreira (2011) mencionou que ao incidir sobre um alvo, a radiação proveniente do Sol, interage com o seu material constituinte e pode ser parcialmente refletida, absorvida ou transmitida. Dessa forma, os objetos da superfície terrestre como a vegetação, a água e o solo refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda e com as suas características biológicas, físicas e químicas (FLORENZANO, 2002).

O processamento de imagens é uma equação ou conjunto de equações aplicadas aos dados dos sensores, armazenando os resultados da computação para cada pixel (LILLESAND et al., 2004). O resultado forma uma nova imagem digital que pode ser exibida ou armazenada em formato pictórico, para ser manipulada posteriormente em programas computacionais.

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto (SR) tem se mostrado promissora na estimativa de índices de vegetação, biomassa, *status* hídrico e nutricional das plantas (ANDRADE et al., 2014; ANDRADE et al. 2016; GOMES et al., 2009; PEREIRA et al., 2016), permitindo ampliar o diagnóstico espaço-temporal de cenários em diferentes áreas. Os produtos do SR tornaram-se uma importante ferramenta para as mais variadas aplicações, particularmente aquelas relacionadas com a avaliação, o manejo, o gerenciamento e a gestão de recursos naturais (OLIVEIRA & GALVÍNCIO, 2011), inclusive para a evapotranspiração.

## **2.2 Evapotranspiração**

A evapotranspiração (ET) compreende a transferência de água da superfície do solo ou de superfícies com água livre (evaporação) e da vegetação através dos estômatos (transpiração) para a atmosfera (PEREIRA et al., 1997). Nesse processo, a água transita do estado líquido para o gasoso, e esta transferência é condicionada pelo estado físico da atmosfera, pelas características do solo, dos corpos hídricos e



da vegetação. Mais especificamente, a transpiração (T) consiste na vaporização e remoção para a atmosfera da água contida no interior do tecido vegetal (ALLEN et al., 1998). Dessa forma, no sistema solo-água-planta, os vegetais constituem vias intermediárias de circulação d'água do solo para a atmosfera (RIVAS, 2004). Na fase final de circulação no tecido vegetal, as plantas transferem água para a atmosfera na forma de vapor, caracterizando assim a transpiração vegetal. Nesse processo, em que gases e vapor d'água são liberados pelos estômatos localizados nas folhas das plantas, há liberação de calor da massa vegetal (ALLEN et al., 1998).

O conceito de evapotranspiração potencial (ETp) é definido como a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas, totalmente coberta por vegetação baixa, de altura uniforme e com elevado índice de área foliar, de crescimento ativo na fase adulta e teor de água do solo próximo ou na capacidade de campo (CARVALHO et al., 2011). Uma vez que o conceito de ETp é bastante amplo, surgiu o conceito de evapotranspiração de referência (ET0), que é a evapotranspiração máxima de um cultivo de referência, hipotético, em perfeitas condições hídricas, nutricionais e fitossanitárias, com altura de 12 cm e em fase de crescimento, que deve proporcionar uma cobertura total do solo em área extensa e com boa disponibilidade hídrica (ALLEN et al., 1998).

O processo de evapotranspiração nem sempre ocorre conforme as condições hipotéticas. Por este motivo utiliza-se o conceito de evapotranspiração real (ETr), o qual retrata a quantidade de água verdadeiramente perdida para atmosfera em forma de vapor pelo sistema solo-planta. A ETr tende a ser menor que a ETp e, em alguns casos, pode igualar-se a esta. Apenas em situações extremas a ETr pode ser maior que a ETp, como ocorre logo após uma chuva, em virtude da evaporação da água interceptada pelas plantas (ENTRAIGAS et al., 2001; INOUE & MORAN, 1997).

Para a estimativa do consumo de água pelas culturas podem-se aplicar equações a partir da evapotranspiração de referência (ET0). A cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética, cujas características se assemelham à evapotranspiração da grama. Isto permite que os valores numéricos sejam os parâmetros constantes adotados no cálculo da ET0. Estes parâmetros, para a cultura hipotética, são: altura entre 0,10 e 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água correspondente a  $69 \text{ s m}^{-1}$  (ALLEN et al., 1998).

Dessa forma, sabe-se que parâmetros agrometeorológicos, características da cultura, manejo e aspectos ambientais são fatores que afetam diretamente a ETr. Bem como a cobertura do solo, densidade no plantio, arquitetura das plantas, microclima e umidade do solo.

Os valores da evapotranspiração potencial (ETp) podem se desviar dos valores da ETr de cultura, devido à ocorrência de pragas e doenças, salinidade do solo, baixa fertilidade do solo, deficiência ou excesso de água no solo (TEIXEIRA et al., 2009).

Segundo Mello et al. (1996), sabe-se que existem entre 50 e 60 equações para a estimativa da evapotranspiração, das quais algumas equações são baseadas em dados meteorológicos para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>). Outros métodos são mais precisos e de difícil aplicação, não só pela complexidade dos cálculos, mas, também, por exigirem um grande número de dados meteorológicos, nem sempre disponíveis (BERNARDO et al., 2008; TEIXEIRA et al., 2014).

Os procedimentos clássicos utilizados para a determinação da evapotranspiração constituem-se dos métodos diretos, como os lisímetros, e os métodos indiretos, que estimam a ET por meio de equações que utilizam dados medidos em estações meteorológicas. Experimentalmente, o cálculo da evapotranspiração pode ser feito com bastante precisão a partir de lisímetros de pesagem, de drenagem e de lençol freático constante, além de métodos como a razão de Bowen (ALLEN et al., 2002; TUCCI, 2007) ou correlações turbulentas (SHUTTLEWORTH, 2007; DING et al., 2010).

A evapotranspiração da cultura é obtida pela medida da energia disponível ( $R_n - G$ ), determinação dos fluxos de calor sensível (H) e de calor latente (LE), obtidos por meio do método do balanço de energia pela razão de Bowen (BERB), que se baseia na relação do fluxo-gradiente e da transferência de massa entre a superfície e a atmosfera, bem como pelo método das correlações turbulentas ou “*Eddy Covariance*”, que mede diretamente os fluxos de calor latente e de calor sensível. Esses métodos têm sido amplamente aplicados em culturas como: milho (STEDUTO; HSIAO, 1998), alfafa (TODD et al., 2000), café (MARIN, 2003; RIGHI, 2004), forrageira (SILVA et al., 2005), videira (TEIXEIRA et al., 2007), cana-de-açúcar (MOURA et al., 2007; SILVA, 2009), manga (TEIXEIRA; BASTIAANSSEN, 2012), entre outras.

A cana-de-açúcar cultivada no Submédio do Vale do São Francisco apresenta elevados índices de produção devido às condições climáticas favoráveis, uso da irrigação, seleção de cultivares e controle fitossanitário. Em estudos realizados por Carmo et al. (2017) na mesma região semiárida, verificou-se que métodos de correlações turbulentas subestimaram os valores da evapotranspiração da cultura, quando comparados com fluxos obtidos pelo método da razão de Bowen, observando que maior parte da energia disponível foi convertida em ETr (CARMO et al., 2017).

A ET diária na cana-de-açúcar apresenta variação conforme a sazonalidade (época de plantio, e por conseguinte, de desenvolvimento da cultura); a cultivar (algumas são mais ou menos exigentes em água); o manejo e tratos culturais; o estágio fenológico; dentre outros fatores. Deste modo, estudando a lavoura de cana-de-açúcar no município de São Manuel, Machado et al. (2014) encontraram valores no intervalo de 0,54 a 2,83 mm dia<sup>-1</sup>, bem como na região canavieira no litoral sul de Pernambuco, em que a ET na mesma cultura variou de 2,0 a 5,5 mm dia<sup>-1</sup>. Para a região de Botucatu-SP, Moraes et al. (2014) obtiveram valores de ET entre 0,41 e 4,86 mm dia<sup>-1</sup>, em condições de variabilidade espacial climática sobre o cultivo de cana-de-açúcar, onde os valores mais baixos foram decorrentes de áreas com solo exposto e fase inicial de cultivo. No mesmo ano Lira et al. (2008) mapearam a ET diária da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do São Francisco, encontrando valores da cultura entre 4,70 e 6,43 mm dia<sup>-1</sup>. Já Silva et al. (2015) em estudo de demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas obtiveram ET da cultura com média de três ciclos variando de 1,73 a 5,04 mm dia<sup>-1</sup>.

### 2.3 Modelo SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving)

O uso de imagens de satélite para estimativas da evapotranspiração ocorre pela aplicação de métodos empíricos e físicos (GOWDA et al., 2008; KALMAN et al., 2008). Os métodos físicos são aqueles baseados no balanço de energia (BASTIAANSSEN et al., 1998a; ALLEN et al., 2007), cuja aplicabilidade tem início com o cômputo do balanço de radiação.

A equação do saldo de radiação ( $R_n$ ) pode ser resolvida por uma combinação de dados de sensoriamento remoto (albedo, emissividade e temperatura da superfície) e dados de campo (radiação solar global e radiação de ondas longas incidentes), conforme a equação a seguir (BASTIAANSSEN, 1995; MORSE et al., 2001; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2002):

$$R_n = R_{s\downarrow}(1 - r_0) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (1)$$

em que  $R_{s\downarrow}$  é a radiação de ondas curtas incidente em cada pixel;  $r_0$  é o albedo corrigido de cada pixel;  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção do pixel;  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e  $\varepsilon_0$  é a emissividade de cada pixel da cena escolhida.

A emissividade da superfície tem sido estimada por meio de equações empíricas utilizando índices de vegetação (BASTIAANSSEN et al., 1998a; 1998b; ALLEN et al., 2007). Segundo (TASUMI et al., 2008), o albedo tem sido estimado por meio da combinação linear de bandas hiperespectrais situadas entre o visível e o infravermelho. Em que se aplicam fatores de correção para os sensores utilizados na mensuração (VAN HELLMONT & RUDDICK, 2014).

O método do balanço de energia utilizando medições por satélites têm apresentado vantagens para vegetação nativa e culturas agrícolas em diferentes estágios de desenvolvimento. No entanto, para culturas como uva e manga é necessária a avaliação em condições extremas, que podem ser observadas durante as estações secas e chuvosas (TEIXEIRA et al., 2012). Dessa forma, foram desenvolvidos trabalhos em que se utilizaram o algoritmo Surface Energy Balance Algorithm for Land – SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998a). Esse modelo exige a presença de condições hidrológicas extremas dentro da cena, podendo levar a baixa precisão dos dados, na escolha equivocada do pixel quente e frio, principalmente

para época chuvosa, quando ocorrem valores de fluxo de calor latente similares na imagem. Porém, quando bem aplicado, algoritmos para estimativa de ET, apresentaram resultados satisfatórios para a Caatinga (MIRANDA et al., 2017), cultivo irrigado de frutíferas e olerícolas (BATISTA et al., 2014). Além do SEBAL, o METRIC tem sido aplicado para soja, trigo, cana-de-açúcar, eucalipto e pastagem (GIONGO, 2011; UDA, 2016).

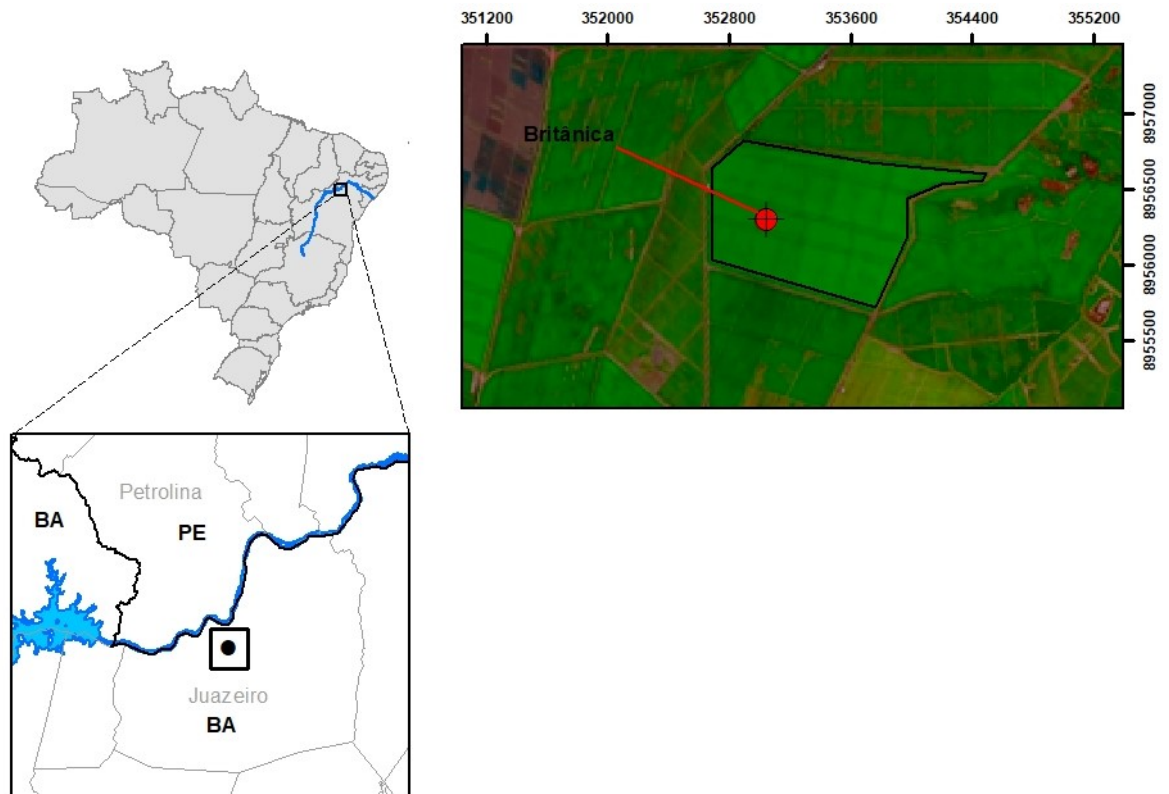
Em busca de uma metodologia mais simples para a determinação da ETr foi proposto o Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving – SAFER, a partir do qual podem-se obter frações da evapotranspiração real em relação a evapotranspiração de referência para diferentes situações de cobertura vegetal. Em relação aos modelos que utilizam o balanço de energia, o SAFER possui uma parametrização mais simples, necessitando apenas de dados remotos de albedo, NDVI e temperatura da superfície. Esse modelo dispensa a calibração usando condições extremas, como o SEBAL, e possui aplicação direta, necessitando apenas dos dados de evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), radiação solar global (R<sub>g</sub>) e temperatura média do ar (T<sub>a</sub>), estes obtidos em estações agrometeorológicas. Portanto, antes da obtenção da estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto é necessário efetuar o pré-processamento das imagens de satélite. Esses procedimentos são definidos como correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas para o cálculo da evapotranspiração (TEIXEIRA et. al, 2010).

Assim, o algoritmo Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving (SAFER) foi desenvolvido e validado na região do Semiárido brasileiro, para obter os valores da evapotranspiração real (ETr), que em conjunto com o saldo de radiação e o equacionamento matemático do balanço de energia, permite quantificar o fluxo de calor latente e sensível (TEIXEIRA et al., 2013). A mensuração e estimativa diária da evapotranspiração real (ETr) têm proporcionado sua aplicação no ajuste do manejo agrícola, seja para balanço hídrico regionais, sazonalidade, zoneamentos agrícolas, como também na concepção e tomada de decisões quanto a gestão dos recursos hídricos (TEIXEIRA et al., 2014), possibilitando a validação com dados de campo para as condições do Submédio do São Francisco tem sido utilizada para regiões centro-oeste e sudeste do país (ANDRADE et al., 2016), apresentando resultados expressivos (MIRANDA et al., 2017).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização, clima e solo

O estudo foi realizado em área comercial cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) na empresa Agroindústrias do Vale São Francisco S.A. (Agrovale), localizada no município de Juazeiro, BA, no Vale São Francisco (Figura 1).



**Figura 1** - Área de estudo com destaque para localização do canal selecionado para modelagem da evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale São Francisco.

Essa região apresenta clima tropical semiárido (ALVARES et al., 2013), com radiação solar incidente variando de 20,6 a 14,4 MJ m<sup>-2</sup>, respectivamente nos meses de outubro e junho, com elevada oferta anual de radiação solar (18,2 MJ m<sup>-2</sup>), resultando em temperatura do ar média de 24,4 °C no mês de julho e de 28,5 °C em novembro (TEIXEIRA, 2010). A precipitação concentra-se entre os meses de dezembro a março, totalizando média de 475 mm, enquanto a evapotranspiração é da ordem de 2.226 mm, resultando em ausência de excedente hídrico e total deficiência de água (BAGAGIM et al., 2017), sendo, dessa forma, imperativo o uso de irrigação para o sucesso dos cultivos agrícolas em escala comercial.

O tipo de solo das áreas onde foram realizados os experimentos de campo é VERTISSOLO. De acordo com Cunha et al. (2008), são solos minerais com no mínimo 30% de argila; feições morfológicas características com fendas de retração largas e profundas que surgem quando encontra-se seco; elevado teor de argilas do tipo 2:1, que se caracterizam por provocarem expansões e contrações, respectivamente quando úmidos e secos; pouco permeáveis e baixa drenagem.

Para este estudo foi selecionada uma área comercial de cana-de-açúcar plantada com a cultivar VAT 90-212, irrigada por gotejamento subsuperficial, conforme descrição apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1** - Caracterização do canavial comercial de cana-de-açúcar selecionado para os estudos de validação da evapotranspiração real da cana-de-açúcar obtida por sensoriamento remoto e dados micrometeorológicos na Usina Agrovale S.A., em Juazeiro, BA.

<b>Características</b>	<b>Canavial Britânica</b>
Variedade	VAT 90-212
Sistema de irrigação	Gotejamento subsuperficial
Espaçamento em fileiras duplas	1,3 m x 1,0 m
Data de plantio	janeiro/2013
Ciclo avaliado	3ª folha
Data de início da safra	junho/2015
Data de colheita da safra	maio/2016
Irrigação da safra	1.591 mm
Produtividade	148 tha <sup>-1</sup>
Sistema de Colheita	Manual/Queimada
Área (ha)	113,35 ha

### 3.2 Aquisição e processamento das imagens de satélite

As imagens de satélite foram obtidas junto ao catálogo de imagens da Empresa Norte Americana de Espaço e Aeronáutica (National Aeronautics and Space Administration – NASA), disponíveis no site: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. No ato da busca das imagens hiperespectrais do satélite MODIS foram utilizados os produtos: MOD09Q1 e MOD16A2 (Tabela 2). Em que após o download das imagens, verificaram-se os arquivos metadados, onde foram aplicados filtros de nebulosidade menor que 50%, com a finalidade de diminuir ruídos radiométricos provenientes de instabilidades atmosféricas. Aplicaram-se parâmetros de reescalonamento espectral (observados nos arquivos metadados), para os anos de 2015 e 2016, obtendo-se a refletância (MOD09Q1) para as datas de obtenção das imagens e a evapotranspiração acumulada em 8 dias (MOD16A2).

No pré-processamento das imagens, nas etapas de correção e reescalonamento, bem como composição de mapas de saídas utilizou-se o software QuantumGIS (GNU, 2017). Já para aplicação dos algoritmos e modelagem das imagens para a obtenção dos parâmetros utilizou-se o software SPRING (INPE, 2003).



**Tabela 2** - Dados dos produtos MODIS (MOD09Q1 e MOD1A2) utilizados para obtenção da reflectância e evapotranspiração.

Data	Dia Sequencial do ano	Reflectância Banda 1	Reflectância Banda 2	ET <sub>MODIS</sub> (mm 8 dias <sup>-1</sup> )
04/07/2015	185	0,0525	0,1759	29,21
28/07/2015	209	0,0680	0,1485	50,29
05/08/2015	217	0,0658	0,1479	47,02
21/08/2015	233	0,0756	0,2055	37,70
06/09/2015	249	0,0628	0,2059	33,84
30/09/2015	273	0,0723	0,2719	39,57
16/10/2015	289	0,0480	0,2760	39,84
01/11/2015	305	0,0830	0,4046	40,45
09/11/2015	313	0,0447	0,3308	47,02
17/11/2015	321	0,0532	0,3377	45,74
25/11/2015	329	0,0678	0,4753	48,00
03/12/2015	337	0,0575	0,3847	49,07
11/12/2015	345	0,0391	0,4044	51,45
19/12/2015	353	0,0428	0,4243	43,46
27/12/2015	361	0,0325	0,4608	30,50
26/02/2016	57	0,0348	0,4023	53,48
05/03/2016	65	0,0406	0,4273	51,42
30/04/2016	121	0,0581	0,5517	39,34
08/05/2016	129	0,0684	0,4932	39,60
16/05/2016	137	0,0534	0,4800	40,58

### 3.3 Evapotranspiração pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen

A determinação da ET em campo foi realizada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (RB) para a safra 2015-2016, por meio de medições realizadas por sensores eletrônicos instalados em uma torre micrometeorológica de 8 metros de altura, no centro do canal estudado.

Foram realizadas medições do saldo de radiação (Rn); da radiação solar global incidente (Rg) e refletida (Rr); da radiação de ondas emitida pela atmosfera (Ra) e pela superfície (Rs); da precipitação pluviométrica (P); do fluxo de calor no solo (G); da temperatura (T) e umidade relativa (UR) do ar; e da temperatura do ar de bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu), sendo estes últimos instalados em dois níveis acima do dossel vegetativo.

De forma resumida, para aplicação do balanço de energia, é necessária a determinação do fluxo de calor latente (LE), de calor sensível (H), do calor no solo (G) e do saldo de radiação (Rn), todos em  $W m^{-2}$ , conforme expressão:

$$Rn = LE + H + G \quad (2)$$

Uma vez que Rn e G foram medidos por meio de sensores instalados na torre micrometeorológica, os fluxos de H e LE foram determinados segundo o método da razão de Bowen (RB), como sendo:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (3)$$

$$H = \frac{\beta(Rn - G)}{1 + \beta} \quad (4)$$

Onde Rn, H, LE e G foram obtidos em  $W m^{-2}$ , e RB é a razão de Bowen (adimensional), expressa como:

$$\beta = \gamma \left( \frac{\Delta t}{\Delta e} \right) \quad (5)$$

em que  $\Delta t$  e  $\Delta e$  são as diferenças de temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ) de pressão de vapor d'água (kPa), respectivamente, entre dois níveis acima do dossel da cultura.

Aplicou-se a metodologia proposta por Perez (1999) para verificação dos erros associados ao método RB e validação das estimativas de  $\beta$ , LE e H, considerando "válidos" os dias em no mínimo 80% dos dados dos horários diurnos foram consistentes (SILVA et al., 2011). Análises e descrições detalhadas foram apresentadas por Carvalho et al. (2018).

### 3.4 Aplicação do SAFER

Inicialmente para a utilização do modelo SAFER foi feito o reescalonamento das reflectâncias obtidas com o produto MODIS MOD09Q1, conforme descrito a seguir:

$$\rho_{\lambda} = [(DN_{Bi} * Re_{Bi})] \quad (6)$$

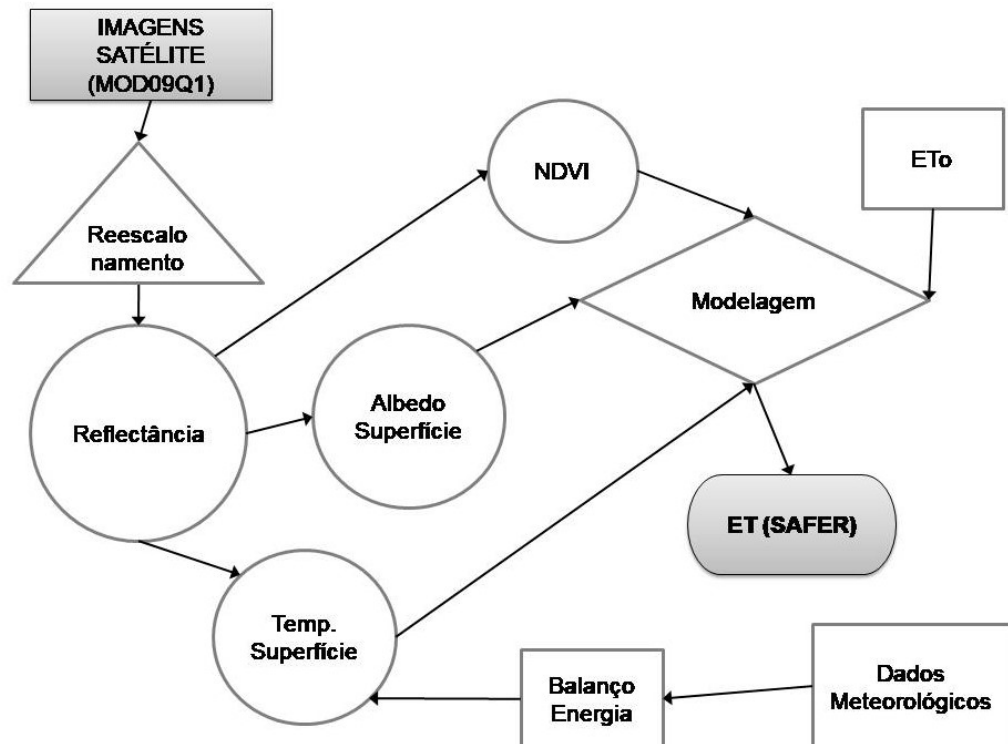
onde:

$\rho_{\lambda}$  = Refletância espectral ( $W m^{-2} \cdot sr \cdot \mu m$ )

$DN_{Bi}$  = Imagem com número digital das bandas hiperespectrais

$RE_{Bi}$  = Fator multiplicativo de redimensionamento das bandas hiperespectrais

Em seguida, obtiveram-se os parâmetros de entrada do modelo SAFER: Temperatura da superfície ( $T_s$ ), Albedo de superfície ( $\alpha_s$ ) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), conforme fluxograma apresentado na Figura 2.



**Figura 2** - Fluxograma para aplicação do modelo SAFER na obtenção da evapotranspiração real (ETr) de áreas com cana-de-açúcar com imagens MODIS.

No processo de parametrização das variáveis de entrada para modelagem com o SAFER foram realizados o balanço de energia e a aplicação das reflectâncias

das bandas 1 e 2 do produto MOD09Q1, como expressos nas equações a seguir (TEIXEIRA et al., 2010):

- i) Transmissividade atmosférica ( $\tau_a$ ):

$$\tau_a = R_g / R_o \quad (7)$$

Em que  $R_g$  é a radiação global diária ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e  $R_o$  é a radiação no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

- ii) Albedo da superfície ( $\alpha_s$ ):

$$\alpha_s = a + b\rho_1 + c\rho_2 \quad (8)$$

em que  $\alpha_s$  é o albedo da superfície em decimais,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são as reflectâncias das bandas 1 e 2 do produto MOD09Q1 reescalado;  $a = 0,08$ ;  $b = 0,41$  e  $c = 0,14$ .

- iii) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI):

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (9)$$

em que  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são as reflectâncias das bandas 1 e 2 do produto MOD09Q1 reescalado.

- iv) Coeficiente de regressão e distribuição espacial ( $aL$ ):

$$aL = dT_a - e \quad (10)$$

em que,  $T_a$  é a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $d = 6,99$  e  $e = 39,93$ .

- v) Saldo de Radiação ( $R_n$ ):

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_g - aL\tau \quad (11)$$

Onde  $R_n$  é o saldo de radiação diário ( $W m^{-2}$ ),  $R_g$  é radiação global instantânea ( $W m^{-2}$ ).

vi) Radiação solar refletida ( $R_r$ ):

$$R_r = \alpha_s * R_g \quad (12)$$

Onde  $R_r$  é a radiação solar refletida ( $MJ m^{-2}$ ), e  $R_g$  é radiação global instantânea ( $W m^{-2}$ ).

vii) Emissividade da atmosfera ( $\epsilon_a$ ):

$$\epsilon_a = a_a(-\ln \tau)^{b_a} \quad (13)$$

onde:  $a_a$  e  $b_a$  são os coeficientes de regressão iguais a 0,94 e 0,10 respectivamente.

viii) Radiação atmosférica de ondas longas ( $R_a$ ):

$$R_a = \sigma \epsilon_a T_a^4 \quad (14)$$

em que:  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ),  $R_a$  é a radiação atmosférica de ondas longas ( $W m^{-2}$ ),  $T_a$  é a temperatura do ar (K).

ix) Radiação de onda longa emitida ( $R_s$ ):

$$R_s = R_g - R_r + R_a - R_n \quad (15)$$

onde  $R_s$  é a radiação atmosférica de ondas longas ( $W m^{-2}$ )

x) Emissividade da superfície ( $\epsilon_s$ ):

$$\epsilon_s = \alpha_s \ln NDVI + b_s \quad (16)$$

onde  $\alpha_s$  e  $b_s$  são os coeficientes de regressão 0,06 and 1,00 respectivamente.

xi) Temperatura da superfície ( $T_s$ )

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{R_s}{\epsilon_s \sigma}} \quad (17)$$

em que:  $T_s$  = Temperatura da superfície em Kelvin,  $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).

xii) Evapotranspiração real (ETr):

$$\mathbf{ETr} = \left\{ \exp \left[ a + b \left( \frac{T_s}{\alpha_s * NDVI} \right) \right] \right\} \mathbf{ET}_0 \quad (18)$$

onde: ETr = Evapotranspiração real diária (mm),  $T_s$  = Temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\alpha_s$  = Albedo da superfície (decimal),  $NDVI$  = Normalized Difference Vegetation Index.

Os coeficientes de regressão  $a = 1,90$  e  $b = -0,008$  para o SAFER foram utilizados para as condições Semiáridas brasileiras, conforme Teixeira et al. (2012). Já os dados de ET0 foram referentes aos valores diários obtidos a partir da aplicação da equação de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998) em dados ambientais obtidos uma estação agrometeorológica localizada na Usina Agrovale.

### 3.5 Validação do SAFER para a cana-de-açúcar

Após a obtenção da ETr por meio do SAFER utilizando os coeficientes de ajustes recomendados por Teixeira et al. (2010), verificou-se a validação do modelo para as condições de cultivo de cana-de-açúcar no Submédio do Vale São Francisco. Para isso, foram realizadas análises de correlações e verificada a significância entre a ETr computada pelo SAFER ( $ET_{SAFER}$ ) e a ETr determinada por

meio de torre micrometeorológica aplicando o método da razão de Bowen ( $ET_{TORRE}$ ).

Nesse processo foram utilizados valores de  $ET_r$  computados pelo modelo SAFER em razão dos valores obtidos pelas torres micrometeorológicas, onde com o auxílio de softwares estatísticos, realizou o ajuste por regressão entre valores modelados com o SAFER em função dos valores obtidos pela razão de Bowen em torres micrometeorológicas. Assim, analisando a correlação entre o modelo SAFER e os valores das torres micrometeorológicas, utilizados na obtenção da  $ET_r$  na cana-de-açúcar cultivada na área de estudo. Também foram realizadas análises de correlação para os componentes do balanço de radiação, albedo e temperatura da superfície obtidos nas imagens de satélite e no campo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Condições climáticas

Na Tabela 3 estão apresentados os dados mensais para o período estudado (Safr de cana-de-açúcar 2015-2016) da radiação global ( $R_g$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); temperatura do ar ( $T_{ar}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ); umidade relativa do ar ( $UR_{ar}$ , %); velocidade do vento a 10 metros de altura ( $V_v$ , em  $\text{m s}^{-1}$ ), precipitação ( $P$ , mm) e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ , mm) obtidos na Estação Meteorológica de Juazeiro do Laboratório de Meteorologia da UNIVASF (LABMET/UNIVASF).

Percebe-se que dois meses após o início da safra (agosto e setembro), os valores de  $T_{ar}$  média diária variaram entre 25,7 e 27,8 $^{\circ}\text{C}$  e posteriormente, na época de máximo crescimento, e na antecedência da colheita (abril e maio) reduziu-se de 28,8  $^{\circ}\text{C}$  para 27,5 $^{\circ}\text{C}$ . Para  $R_g$  foram observados valores entre 22,2  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e 25,2  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (início da safra) e entre 20,1  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e 22,1  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (véspera da colheita); enquanto a  $UR_{ar}$  apresentou valores variando de 52,2% no início da safra e valores próximos de 50,8% na véspera da colheita. Verificou-se ainda que a velocidade média diária do vento se apresentou mais elevada no início da safra (11,70  $\text{m s}^{-1}$ ), mas que reduziu para 9,10  $\text{m s}^{-1}$  para o período anterior a colheita da cultura.

Os dados para safra 2015-2016 corroboram com dados observados por Araújo et al. (2017), que obtiveram máximo perfilhamento da cultura em  $T_{ar}$  média entre 22,5 e 24,5 $^{\circ}\text{C}$ , com  $R_g$  entre 21,0e 21,7  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Segundo dados observados pela Embrapa (2009), as condições climáticas foram favoráveis ao desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, com temperaturas médias diárias entre 22 a 30 $^{\circ}\text{C}$  na fase de crescimento vegetativo.

As condições climáticas durante a safra de cana-de-açúcar 2015-2016 apresentaram poucas variações quando comparadas às normais climatológicas analisadas por Teixeira (2010).



**Tabela 3** - Dados climáticos mensais durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, em Juazeiro, BA.

Mês/Ano	Rg (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	Tar (°C)	URar (%)	V (m s <sup>-1</sup> )	P* (mm mês <sup>-1</sup> )	ET0* (mm mês <sup>-1</sup> )
Junho/2015	17,1	25,7	60,0	11,2	0,3	162,4
Julho/2015	19,2	25,4	57,9	11,3	5,3	184,9
Agosto/2015	22,2	25,7	52,2	11,7	1,3	165,3
Setembro/2015	25,2	27,8	47,0	10,7	0,0	214,2
Outubro/2015	25,8	28,6	46,3	10,8	3,8	230,3
Novembro/2015	27,0	30,6	41,9	10,3	0,0	238,8
Dezembro/2015	26,4	30,2	43,8	11,4	10,9	235,2
Janeiro/2016	19,6	27,2	66,3	9,2	332,3	145,0
Fevereiro/2016	24,7	27,3	60,2	8,8	87,8	127,6
Março/2016	24,4	29,5	50,4	8,2	13,0	155,4
Abril/2016	22,1	28,8	50,8	9,1	13,0	143,7
Maio/2016	20,1	27,5	54,4	9,1	0,0	133,5
Média	22,8	27,9	52,6	10,2	467,7	2.136,2

\* total mensal

Rg = radiação solar incidente; Tar = temperatura média do ar; UR = umidade relativa do ar; V = velocidade do vento; P = precipitação; ET0 = evapotranspiração de referência.

A ET0 do período de estudo correspondeu a 2.136,2 mm, enquanto que a precipitação foi de 467,7 mm. Conforme dados da Tabela 1, o total de irrigação no canal Britânica foi de 1.591 mm. Essa quantidade de água foi suficiente para repor as perdas por evapotranspiração da cultura determinada pelo método da razão de Bowen no canal estudado, que totalizou 1.822 mm (Carvalho et al., 2018).

Em estudos realizados em cana-de-açúcar irrigada, Carmo et. al (2017) verificaram ETr igual a 1.478 mm para safra anual. Por sua vez, Carvalho et. al (2018) nas mesmas condições, verificaram que a disponibilidade hídrica com lâminas de irrigação, juntamente com a precipitação no período da safra, foi igual a 1.984 mm, resultando em uma ETr média diária para a cana-de-açúcar entre 4,4 e 6,9 mm dia<sup>-1</sup>.

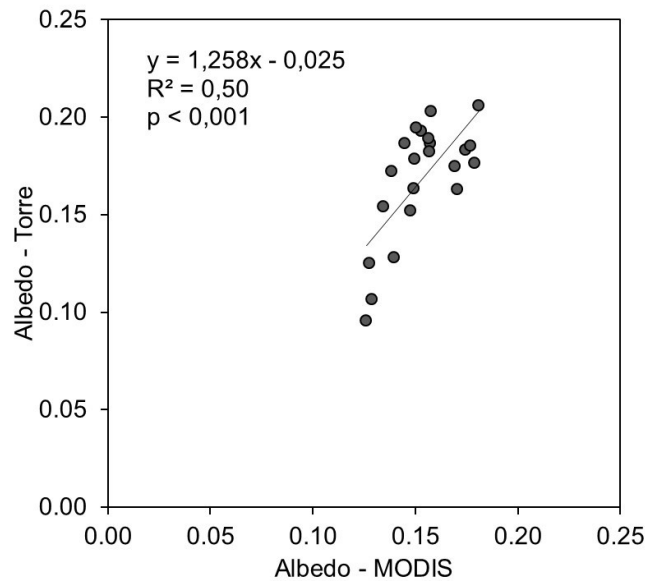
## 4.2 Albedo

Pode-se observar que para o albedo (Tabela 4), não ocorreram variações acima de 2% entre as datas das imagens, com destaque para o crescimento gradativo entre o início da safra, representado pela data 04/07/2015 (albedo = 12,87%), e o início da colheita, representado pela data 08/05/2016 (albedo = 17,71%).

**Tabela 4** - Albedo para canaviais irrigados no Submédio do Vale São Francisco, modelado a partir de imagens do satélite MODIS (MOD09Q1).

Data	NDA	Reflectância		Albedo (%)
		Banda 1	Banda 2	
04/07/2015	185	0,0680	0,1485	12,87
28/07/2015	209	0,0658	0,1479	12,77
05/08/2015	217	0,0525	0,1759	12,62
21/08/2015	233	0,0756	0,2055	13,98
06/09/2015	249	0,0628	0,2059	13,46
30/09/2015	273	0,0723	0,2719	14,77
16/10/2015	289	0,0480	0,2760	13,83
01/11/2015	305	0,0830	0,4046	17,07
09/11/2015	313	0,0447	0,3308	14,46
17/11/2015	321	0,0532	0,3377	14,91
25/11/2015	329	0,0678	0,4753	17,43
03/12/2015	337	0,0575	0,3847	15,74
11/12/2015	345	0,0391	0,4044	15,26
19/12/2015	353	0,0428	0,4243	15,70
27/12/2015	361	0,0325	0,4608	15,78
09/01/2016	9	0,0321	0,4021	14,95
10/02/2016	41	0,0628	0,5237	17,91
26/02/2016	57	0,0348	0,4023	15,06
05/03/2016	65	0,0406	0,4273	15,65
30/04/2016	121	0,0581	0,5517	18,11
08/05/2016	129	0,0684	0,4932	17,71
16/05/2016	137	0,0534	0,4800	16,91

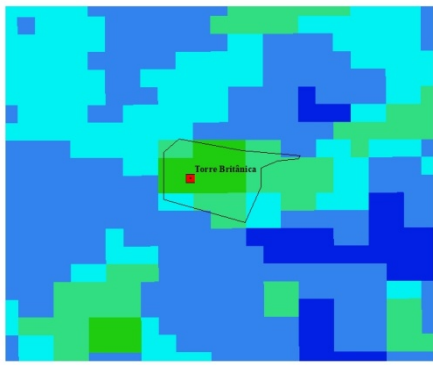
Na torre micrometeorológica do canavial Britânica havia um albedômetro, que registrou em média 16,98% para o início da safra e 21,90% no início da colheita. Avaliou-se a correlação entre os dados modelados entre albedo mesurado na torre (Albedo<sub>Torre</sub>) e o Albedo modelado com as imagens MODIS (Albedo<sub>MODIS</sub>), obtendo uma correlação significativa (Figura 3) ao nível de 1% de probabilidade, com  $r^2 = 0,50$ .



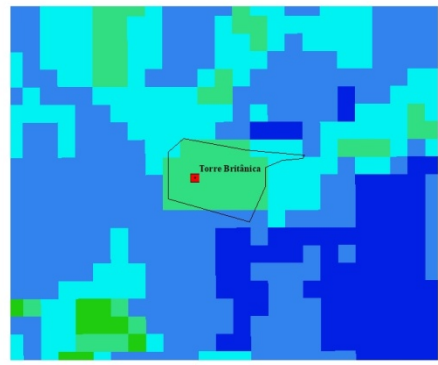
**Figura 3** - Correlação entre o albedo medido na torre e obtido nas imagens MODIS para a cana-de-açúcar irrigada, safra 2015-2016, no Submédio do Vale São Francisco.

Constatou-se que quando ocorreu o crescimento e maturação do canavial, a área cultivada apresentou albedo similar no período de crescimento vegetativo pré-colheita (27/12/2015 a 05/03/2016), apresentando intervalos médios entre 14 e 16%. Esses dados corroboram com informações em áreas de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, em que o albedo variou entre 18 e 20% (GOMES et al., 2009).

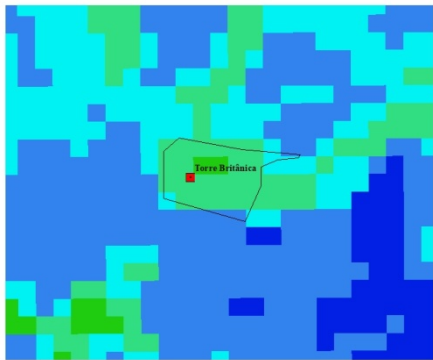
Em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado, utilizando imagens do satélite Landsat 5 TM, Giongo et al. (2010) observaram valores médios de albedo entre 13,5 e 23,1% durante o ciclo anual da cultura. Já Giongo & Vettorazzi (2014) utilizando imagens hiperespectrais na Bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, São Paulo, obtiveram valores de albedo para cana-de-açúcar (25 a 30%). Ainda para o cultivo de cana-de-açúcar em São Paulo, utilizando imagens do Satélite MODIS, Oliveira et al. (2015) relataram que os valores de albedo médio (10,4 a 22,7%) variam de acordo com o ciclo da cultura, com as mudanças das fases fenológicas, bem como a presença de queimada da cana reduz os valores médios e que a palhada sobre o solo aumenta a refletância da lavoura. Ainda sobre dados obtidos experimentalmente em campo no Norte Fluminense por André et al. (2010), o albedo médio teve valores crescentes, variando de 23 a 30%, fato observado com o fechamento gradativo do dossel e o desenvolvimento da cultura.



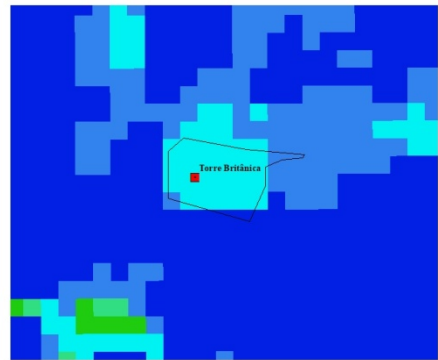
04/07/2015



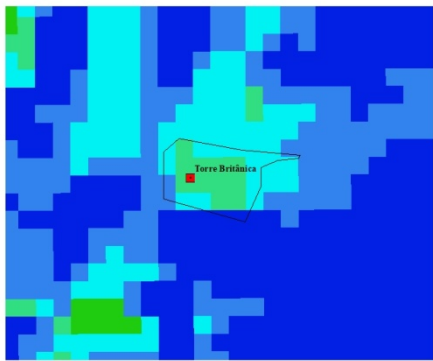
28/07/2015



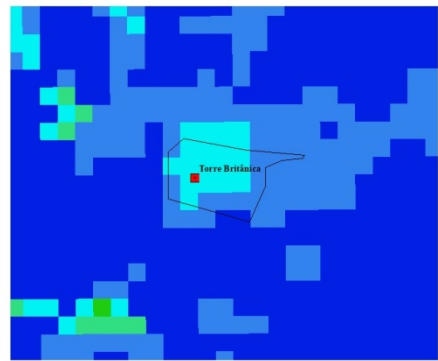
05/08/2015



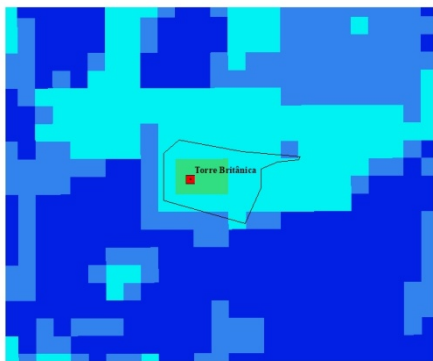
21/08/2015



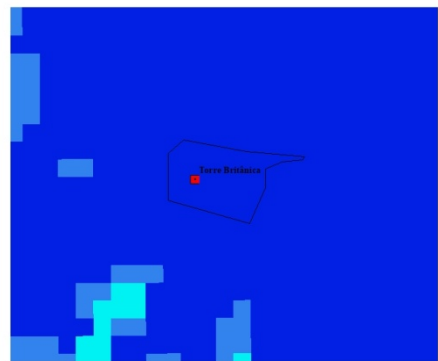
06/09/2015



30/09/2015

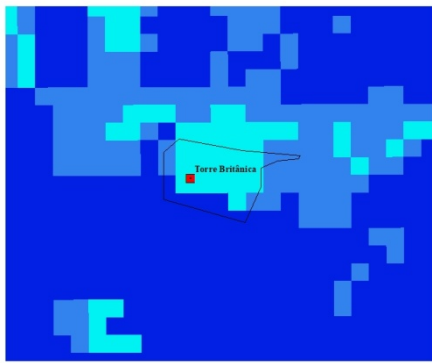


16/10/2015

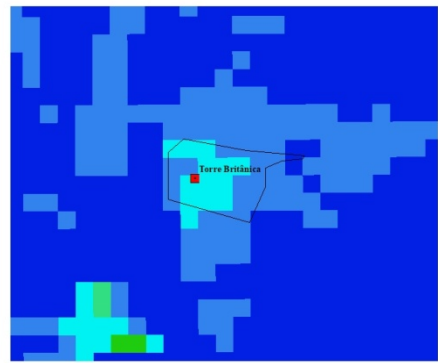


01/11/2015

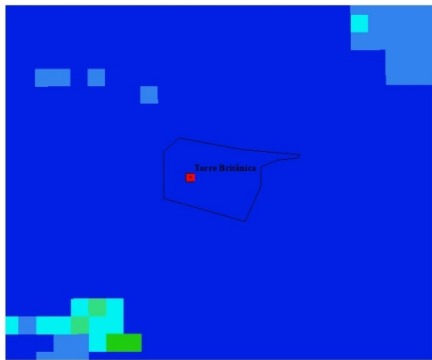
Cont. Fig. 4



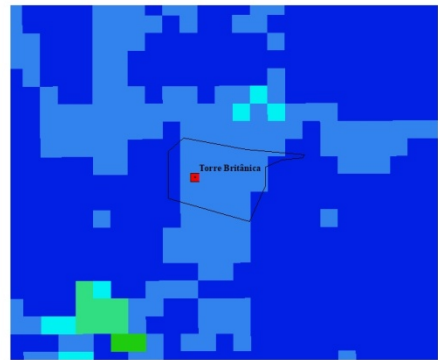
09/11/2015



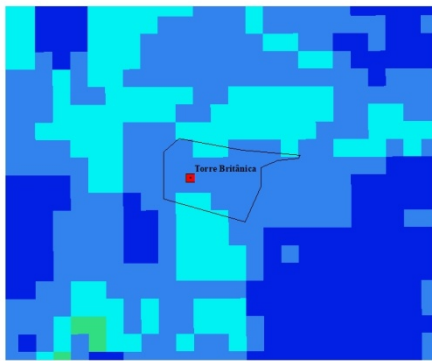
17/11/2015



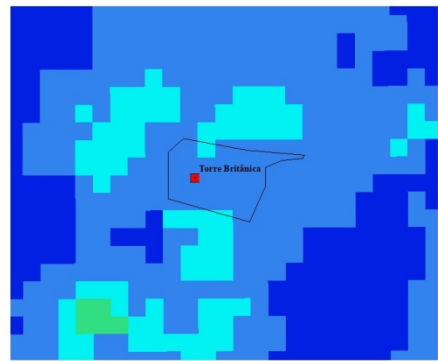
25/11/2015



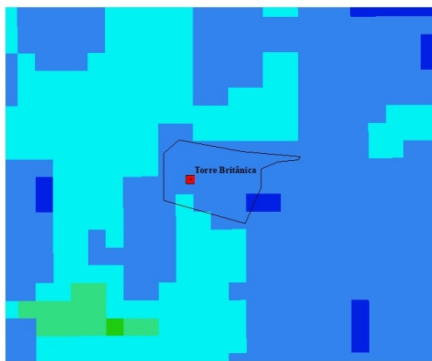
03/12/2015



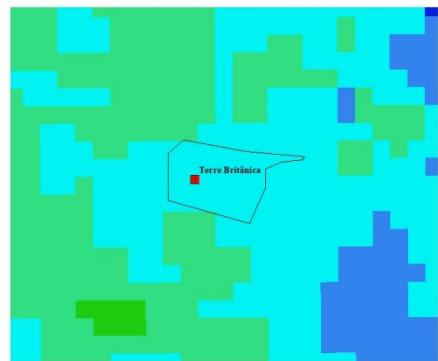
11/12/2015



19/12/2015

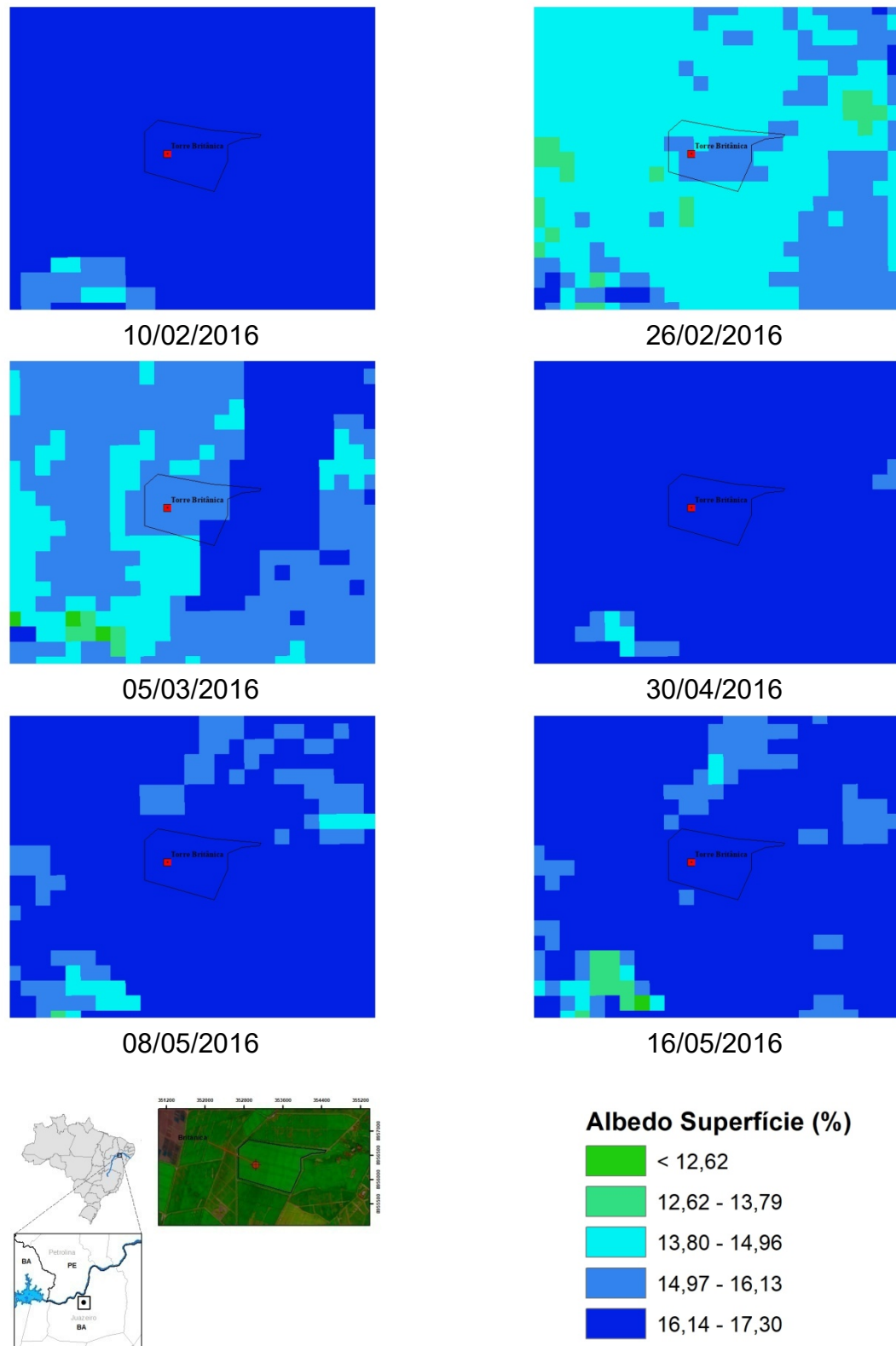


27/12/2015



09/01/2016

Cont. Fig. 4



**Figura 4** - Albedo da superfície (%) em canais irrigados obtidos a partir de imagens do satélite MODIS no Submédio do Vale São Francisco.

### 4.3 NDVI

A variação do NDVI (Tabela 5) apresentou-se como um importante padrão quantitativo na mensuração da área foliar nas imagens orbitais, parâmetro esse determinante para a avaliação e inferência do estágio fenológico e da atividade metabólica das plantas em cada sistema de cobertura do solo. Assim, na cana-de-açúcar o NDVI apresentou intervalos de classe entre 0,37 e 0,50 para períodos iniciais da safra e de 0,70 a 0,80 para período vegetativo.

Já em trabalhos realizados por Esteves et al. (2012) com cana-de-açúcar em áreas comerciais de cultivo em ressoca no estado do Rio de Janeiro, o NDVI pós-corte, ou seja, na fase inicial de crescimento apresentou variação de 0,20 a 0,50, e de 0,60 a 0,70 no período de maturação do mesmo ciclo e em diferentes talhões.

Observou-se que no período que antecede a colheita (30/04/2016 a 16/05/2016) a cultura já tem ocupado quase que totalmente a superfície do solo, com os valores máximos de NDVI (Figura 5) reduzindo o aquecimento do ar próximo ao nível do solo e ainda causando uniformidade na refletância do alvo terrestre, sendo a cobertura vegetal um importante componente de resposta ao balanço energético nas áreas com cultivo agrícola.

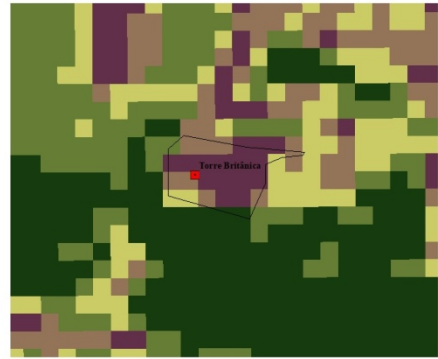
**Tabela 5** - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para canaviais irrigados no Submédio do Vale São Francisco, modelado a partir de imagens do satélite MODIS (MOD09Q1).

Data	NDA	Reflectância		NDVI
		Banda 1	Banda 2	
04/07/2015	185	0,0680	0,1485	0,3718
28/07/2015	209	0,0658	0,1479	0,3842
05/08/2015	217	0,0525	0,1759	0,5403
21/08/2015	233	0,0756	0,2055	0,4621
06/09/2015	249	0,0628	0,2059	0,5326
30/09/2015	273	0,0723	0,2719	0,5799
16/10/2015	289	0,0480	0,2760	0,7037
01/11/2015	305	0,0830	0,4046	0,6596
09/11/2015	313	0,0447	0,3308	0,7619
17/11/2015	321	0,0532	0,3377	0,7278
25/11/2015	329	0,0678	0,4753	0,7503
03/12/2015	337	0,0575	0,3847	0,7399
11/12/2015	345	0,0391	0,4044	0,8237
19/12/2015	353	0,0428	0,4243	0,8167
27/12/2015	361	0,0325	0,4608	0,8682
09/01/2016	9	0,0321	0,4021	0,8521
10/02/2016	41	0,0628	0,5237	0,7858
26/02/2016	57	0,0348	0,4023	0,8408
05/03/2016	65	0,0406	0,4273	0,8265
30/04/2016	121	0,0581	0,5517	0,8094
08/05/2016	129	0,0684	0,4932	0,7564
16/05/2016	137	0,0534	0,4800	0,7998

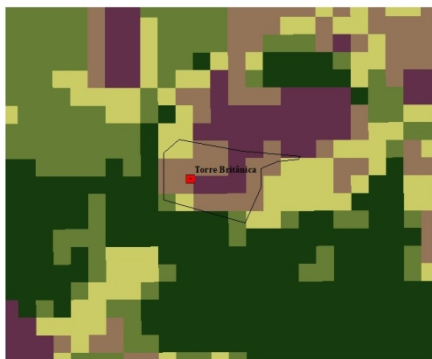




04/07/2015



28/07/2015



05/08/2015



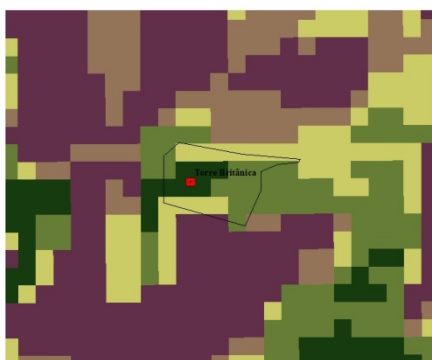
21/08/2015



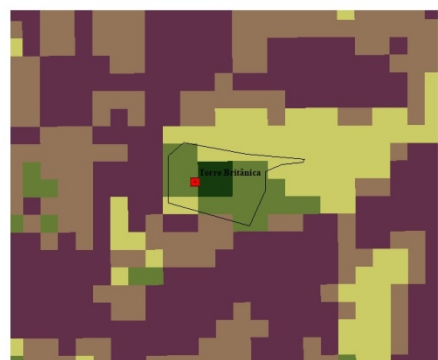
06/09/2015



30/09/2015

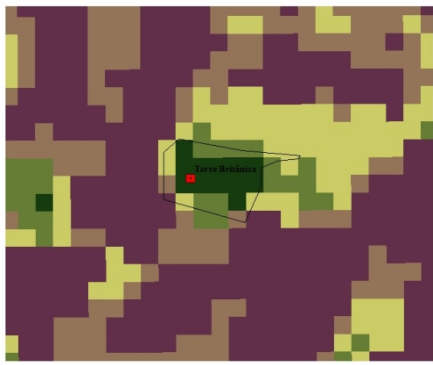


16/10/2015

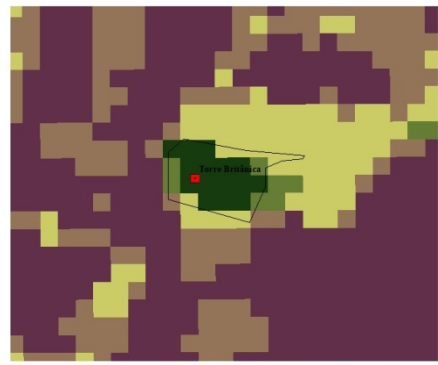


01/11/2015

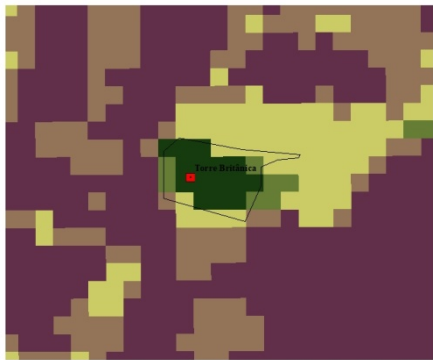
Cont. Fig. 5



09/11/2015



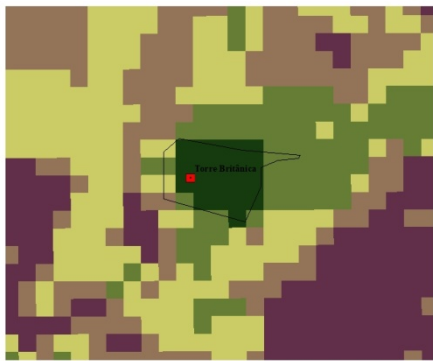
17/11/2015



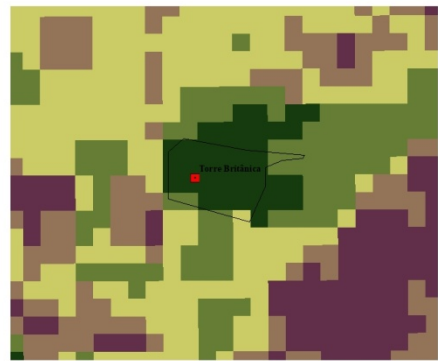
25/11/2015



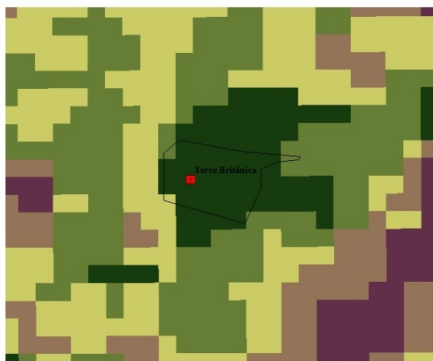
03/12/2015



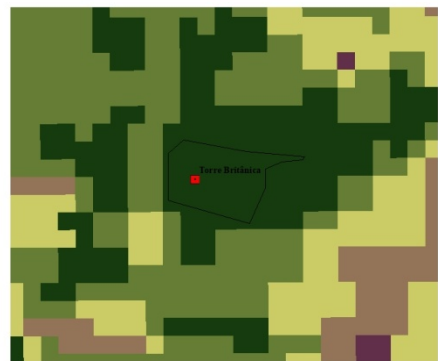
11/12/2015



19/12/2015

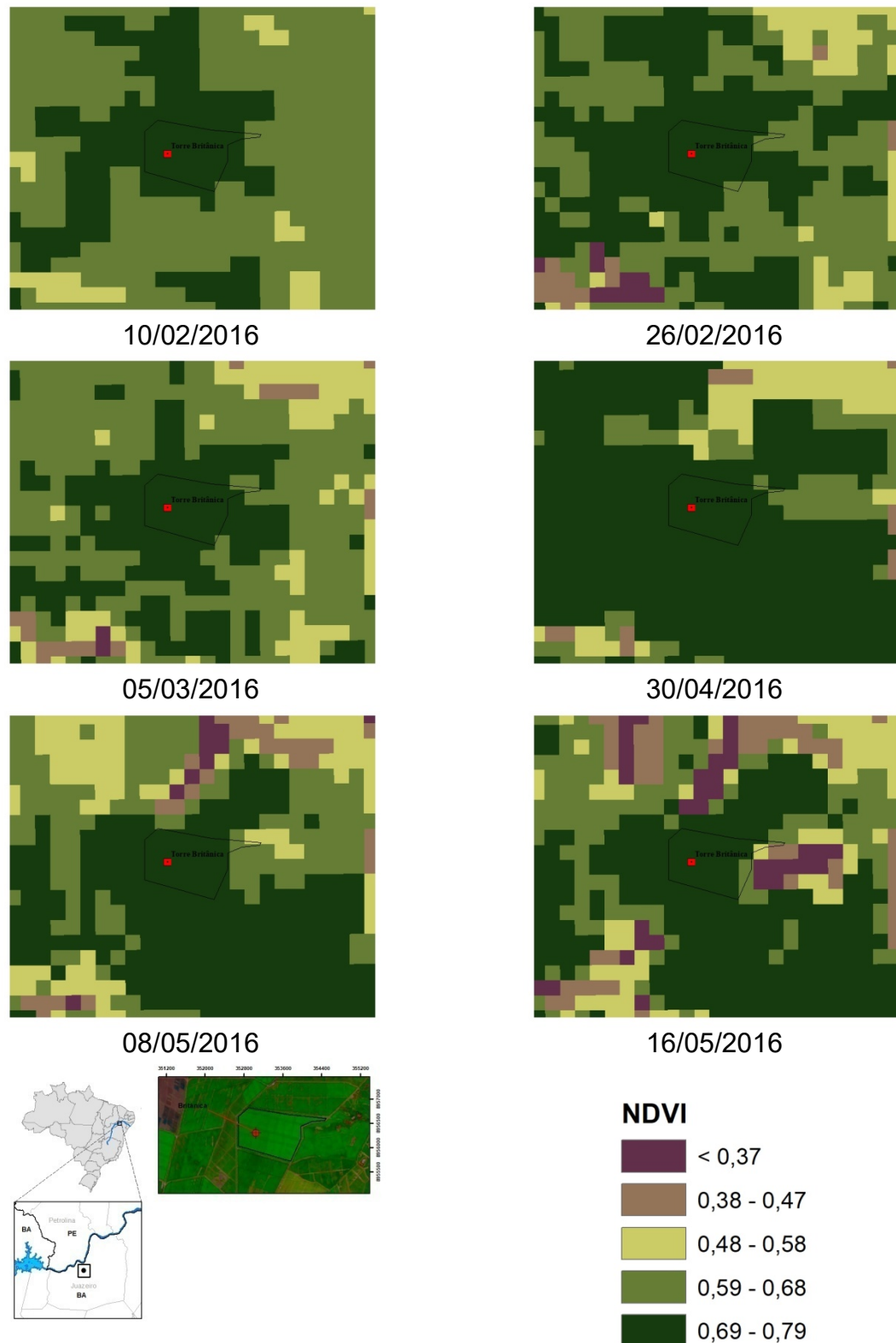


27/12/2015



09/01/2016

Cont. Fig. 5



**Figura 5** – Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) em canais irrigados obtidos a partir de imagens do satélite MODIS no Submédio do Vale São Francisco.

#### 4.4 Temperatura da superfície e componentes do balanço de radiação

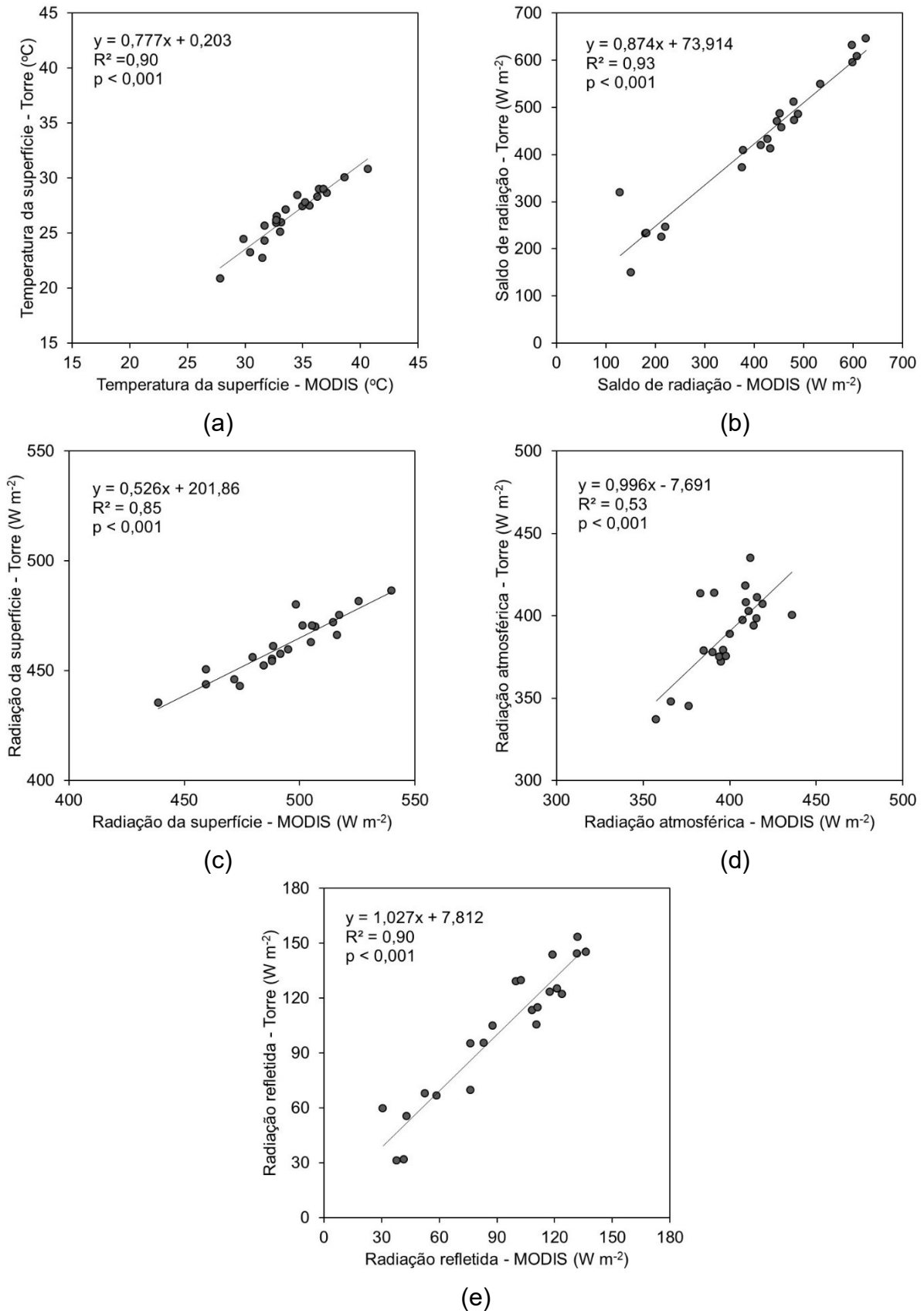
No final do segundo semestre de 2015 teve início o período de maior disponibilidade de energia, com radiação solar global incidente no horário de passagem do satélite variando de 380 a 620 W m<sup>-2</sup> para a região. Na mesma época ocorreram as maiores temperaturas do ciclo produtivo (Figura 6), resultando em maior demanda hídrica da cultura, visto que foi coincidente com a fase de máximo crescimento vegetativo. Notou-se que a temperatura da superfície verificada em agosto de 2015 foi a menor do período de estudo, enquanto entre novembro de dezembro de 2015 observaram-se valores superiores a 36°C no canal em estudo (Tabela 6).

**Tabela 6** - Temperatura da superfície (°C) para canais irrigados no Submédio do Vale do São Francisco, modelado a partir de imagens do satélite MODIS.

Data	NDA	Reflectância		Rg (W m <sup>-2</sup> )	Rn (W m <sup>-2</sup> )	Rs (W m <sup>-2</sup> )	Ts (°C)
		Banda 1	Banda 2				
04/07/2015	185	0,0680	0,1485	330,80	212,32	471,62	31,70
28/07/2015	209	0,0658	0,1479	294,00	179,96	459,44	31,50
05/08/2015	217	0,0525	0,1759	240,40	128,58	438,68	27,84
21/08/2015	233	0,0756	0,2055	544,90	375,46	459,55	30,47
06/09/2015	249	0,0628	0,2059	619,00	432,62	479,59	33,05
30/09/2015	273	0,0723	0,2719	822,00	598,56	498,34	35,59
16/10/2015	289	0,0480	0,2760	551,50	377,88	488,58	33,15
01/11/2015	305	0,0830	0,4046	647,40	445,51	506,87	36,29
09/11/2015	313	0,0447	0,3308	691,30	488,23	488,05	32,70
17/11/2015	321	0,0532	0,3377	883,00	625,97	525,50	38,62
25/11/2015	329	0,0678	0,4753	673,80	451,02	516,35	37,11
03/12/2015	337	0,0575	0,3847	866,00	597,52	539,74	40,63
11/12/2015	345	0,0391	0,4044	672,00	454,57	504,99	34,95
19/12/2015	353	0,0428	0,4243	840,00	607,66	514,48	36,43
27/12/2015	361	0,0325	0,4608	273,50	150,34	474,09	29,89
09/01/2016	9	0,0321	0,4021	587,90	427,19	491,77	32,76
10/02/2016	41	0,0628	0,5237	692,60	479,05	505,40	35,24
26/02/2016	57	0,0348	0,4023	348,60	220,76	484,53	31,69
05/03/2016	65	0,0406	0,4273	760,00	533,23	517,21	36,79
30/04/2016	121	0,0581	0,5517	324,40	182,70	495,09	33,51
08/05/2016	129	0,0684	0,4932	612,20	413,69	488,00	32,72
16/05/2016	137	0,0534	0,4800	657,20	480,65	501,43	34,55

Para a mesma região, estudos realizados por Silva et al. (2013) comprovaram que entre os meses de setembro e março ocorrem os maiores valores de temperatura, em resposta à maior incidência de radiação solar global, e que os valores de umidade relativa do ar foram reduzidos na maior parte do período, apresentando elevação em decorrência dos eventos de precipitação.

Foram realizadas correlações entre os dados de satélite MODIS e da torre para a temperatura da superfície ( $T_s$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ), radiação refletida ( $R_r$ ), radiação de ondas longas emitida pela superfície ( $R_s$ ) e pela atmosfera ( $R_a$ ) (Figura 6), resultando em correlações muito boas.



**Figura 6** - Correlação da temperatura da superfície (a), saldo de radiação (b), radiação emitida pela superfície (c) e atmosfera (d), e radiação refletida (e) entre dados modelados com o MODIS e medidos na torre micrometeorológica para o canal irrigado no Submédio do Vale São Francisco.

#### 4.5 Evapotranspiração real

Os valores da ETr modelados com o SAFER, seguiram o padrão de aumento diretamente proporcional ao crescimento da cana-de-açúcar, que apresentou valores médios da ordem de 3,00 mm por dia nos meses de crescimento vegetativo (setembro a outubro de 2015). Os valores máximos modelados foram em torno de 4,70 mm por dia e ocorreram durante o máximo desenvolvimento vegetativo e na fase de pré-colheita (janeiro a abril de 2016) (Tabela 7). Ressalva-se que, o parâmetro NDVI, referente a fração de área foliar inserida no algoritmo, apresentou relação diretamente proporcional a ETr, em que, a medida que o NDVI aumentava, valores de ETr aumentavam linearmente e de forma positiva, mensuradas a partir da correlação de Pearson ( $r = 0,89$ ).

Os valores da ETr variaram entre 3,00 a 5,00 mm dia<sup>-1</sup> no período de pré-colheita (09/01/2016 a 30/04/2016) (Tabela 7). Resultados com intervalos de classes similares foram encontrados por Silva et al. (2013), que obtiveram ETr entre 6 e 8 mm dia<sup>-1</sup>, sendo esses valores obtidos a partir de dados terrestres pelo método da razão de Bowen e para a mesma época de cultivo da cana-de-açúcar.

Em estudos realizados por Mendonça et al. (2012), aplicando o SEBAL em imagens MODIS, na bacia hidrográfica Rio Tapacurá, no estado de Pernambuco, foram observados valores entre 0 e 6,00 mm dia<sup>-1</sup> para o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar. Já para o Cerrado nos estados de São Paulo e Minas Gerais, Ruhoff et al. (2013) encontraram valores de ETr entre 2,8 e 5,5 mm dia<sup>-1</sup> para época chuvosa e entre 1,2 e 2,6 mm dia<sup>-1</sup> para época seca. Valores esses aproximados aos valores de ET obtidos no início do estágio vegetativo para cana-de-açúcar no presente estudo.

**Tabela 7** - Evapotranspiração real (ETr) para canal irrigado modelado a partir de imagens MODIS e algoritmo SAFER no Submédio do Vale São Francisco.

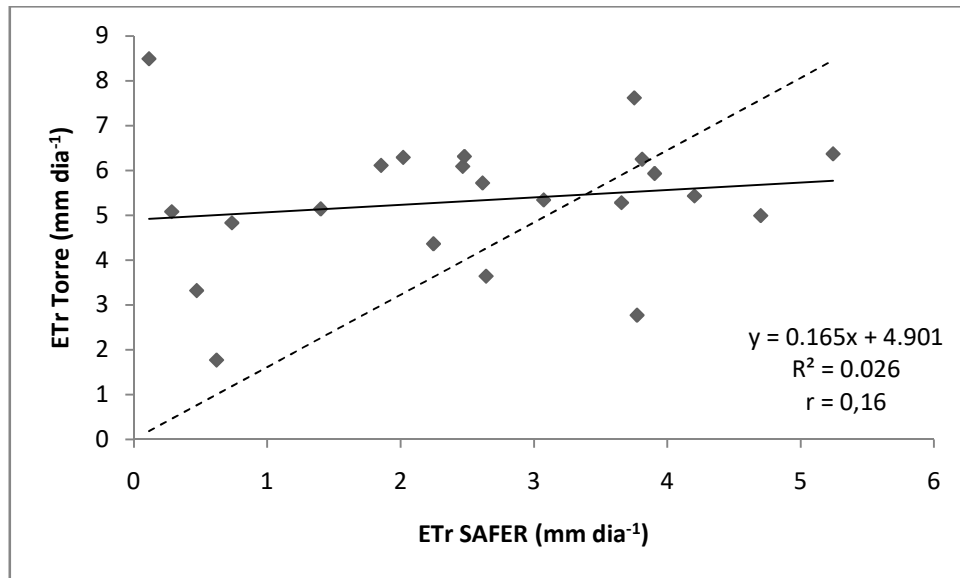
Data	NDA	Ts (°C)	Albedo (%)	NDVI	ETo (mm/dia)	ETr (mm/dia)
04/07/2015	185	31,70	12,87	0,3718	3,27	0,11
28/07/2015	209	31,50	12,77	0,3842	3,97	0,28
05/08/2015	217	27,84	12,62	0,5403	2,91	0,47
21/08/2015	233	30,47	13,98	0,4621	4,04	0,62
06/09/2015	249	33,05	13,46	0,5326	4,40	0,74
30/09/2015	273	35,59	14,77	0,5799	5,82	1,40
16/10/2015	289	33,15	13,83	0,7037	4,23	1,85
01/11/2015	305	36,29	17,07	0,6596	4,43	2,25
09/11/2015	313	32,70	14,46	0,7619	6,06	3,77
17/11/2015	321	38,62	14,91	0,7278	5,21	2,02
25/11/2015	329	37,11	17,43	0,7503	3,57	2,47
03/12/2015	337	40,63	15,74	0,7399	6,04	2,48
11/12/2015	345	34,95	15,26	0,8237	5,19	3,75
19/12/2015	353	36,43	15,70	0,8167	3,80	2,62
27/12/2015	361	29,89	15,78	0,8682	4,49	5,24
09/01/2016	9	32,76	14,95	0,8521	3,60	3,07
10/02/2016	41	35,24	17,91	0,7858	4,33	3,91
26/02/2016	57	31,69	15,06	0,8408	4,05	3,66
05/03/2016	65	36,79	15,65	0,8265	5,55	3,81
30/04/2016	121	33,51	18,11	0,8094	4,38	4,70
08/05/2016	129	32,72	17,71	0,7564	4,44	4,21
16/05/2016	137	34,55	16,91	0,7998	3,05	2,64

#### 4.6 Validação do SAFER para a cana-de-açúcar

Após obtenção dos valores de ETr com a realização do processamento do algoritmo SAFER em imagens MODIS, partiu-se para a validação desses dados, utilizando dados de ET determinados pelo método da razão de Bowen a partir de medidas realizadas na torre micrometeorológica. Uma vez que foram observadas correlações positivas e significativas entre os dados MODIS e da torre para os parâmetros de entrada do modelo, também aplicou-se essas relações para se proceder ao computo de ETr corrigida, porém, não se observou importantes alterações nos valores e nem no comportamento temporal da ETr.



Foi verificada elevada dispersão e não significância entre os dados ao nível de 5% de probabilidade; além muito baixa correlação ( $r = 0,16$ ) (Figura 7), não sendo o SAFER um algoritmo válido e recomendado para estimativa da ETr em cultivos de cana-de-açúcar no Submédio do Vale São Francisco, em especial o município de Juazeiro, BA.



**Figura 7** - Evapotranspiração real (ETr, mm dia<sup>-1</sup>) no canal Britânica a partir de imagens do satélite MODIS e modelo SAFER (ETr SAFER) em comparação com ETr obtida em campo por meio de Torres Micrometeorológicas (ETr TORRE) no município de Juazeiro, BA situado no Submédio do São Francisco.

Em trabalho de validação de imagens processadas com produtos MODIS em razão de dados computados em campo, Kim et al. (2012) também não obtiveram correlações significativas para valores de ETr em regiões vegetadas da Ásia, fato determinado pela complexidade dos ecossistemas e variação no comportamento dos parâmetros meteorológicos na região, assim como observado por Fu et al. (2017) em áreas de pastagem na China. Estes autores não observaram correlação significativa quando comparado produtos MODIS com a aplicação do método de obtenção da ETr em função da aplicação do Eddy covariance, método esse que também utiliza mensurações de parâmetros meteorológicos em campo.

Por fim, percebeu-se que na maior parte das imagens utilizando produtos MODIS e aplicando o modelo SAFER houve subestimativa dos valores mensurados em campo quando se determinou a evapotranspiração da cana-de-açúcar pelo

método da razão da Bowen. Isso tem causando déficit para a evapotranspiração real da cultura determinada pelo SAFER nessa região de Juazeiro, Bahia. Essa inconsistência na estimativa da ET também foi observada por Souza et al. (2016) em grandes culturas, no município de Cachoeira do Sul, RS, mesmo utilizando o sistema de Covariância dos Vórtices Turbulentos (Eddy covariance) e comparando com os produtos MODIS.

## **5. CONCLUSÕES**

O uso do SAFER não apresentou alta eficiência para estimativa da evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) da cana-de-açúcar cultivada no Submédio do Vale do São Francisco no município de Juazeiro, BA. Durante a safra 2015-2016 os parâmetros de entrada modelados com o algoritmo SAFER em produtos MODIS apresentaram altas correlações com os dados observados em campo, e mesmo assim a ET<sub>r</sub> modelada subestimou, em várias imagens, os valores determinados em campo pelo método da razão de Bowen.

Recomenda-se efetuar correções para todos os coeficientes dos parâmetros ambientais, como temperatura da superfície e os componentes do balanço de radiação, determinados pelo MODIS, por meio de equações lineares e seus coeficientes específicos antes de aplicar o SAFER para determinação da ET<sub>r</sub> da cana-de-açúcar na região do Submédio do Vale São Francisco.

Novos estudos são necessários para validar e calibrar o modelo SAFER para a cana-de-açúcar nas condições do Submédio do Vale São Francisco, aplicando-se outros métodos de determinação da ET em campo e avaliando outros períodos de produção.

## 6. LITERATURA CITADA

ALLEN, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**: 56,300p.1998.

ALLEN, R. G.; Bastiaanssen, W. G. M.; Trezza, R.; Tasumi M. Waters, R. Surface energy balance algorithms for land - **Advance training and user's manual**, version 1.0, p. 98, 2002.

ALLEN, R. G.; Assume, M.; Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.133, n.2, p.380-394, 2007.

ALMEIDA, C. M. Aplicações de Sistemas de Sensoriamento Remoto por Imagens e o Planejamento Urbano Regional, **Revista Eletrônica de Arquitetura e Urbanismo (USJT)**, v.3, p. 98-103, 2010.

ALVARES, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMORIM, R. F.; Almeida, S. A. S.; Cuellar, M. Z.; Costa, A. M. B. G. Mapeamento de Uso e Ocupação do solo na Bacia Hidrográfica Piranhas/Açu, utilizando imagens CBERS e técnicas de classificação supervisionada, **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, 2007, Florianópolis, SC, Anais, São José dos Campos: INPE, 2007.

ANDRADE, R. G.; Sedyama, G.; Soares, V. P.; Gleriani, J. M.; Menezes, S.J.M.C.; Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o SEBAL e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.3, p. 433-442, 2014.

ANDRÉ, R. G. B.; Mendonça, J. C.; Marques, V. da S.; Pinheiro, F. M. A.; Marques, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p. 375 - 382, 2010.

ARAÚJO, R. M.; Oliveira, R.A. de; Cuadra, S. V.; Almeida, I.R. de; Weber, H. Condições agrometeorológicas para perfilhamento máximo da cultura de cana-de-açúcar em dois ambientes distintos de produção. **Agrometeoros**, Passo Fundo - RS, v.25, n.1, p.257-264, 2017.

BAGAGIM, J. B. C.; Pereira, W. de B.; Sousa, J. S. C. de; Santos, M. E. P. dos; Moura, M. S. B. Balanço Hídrico Climatológico Normal para a Estação Agrometeorológica de Mandacaru localizada em Juazeiro-BA. **20º Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. 5º Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação no Semiárido Brasileiro**, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia CD-ROM, Juazeiro, BA. 2017.

BARBOSA, M. L.; Silva, T. G. F. da.; Zolnier, S.; Siqueira e Silva, S. M.; Araújo Jr., G. N.; Jardim, A. M. R. F. Meteorological variables and morphological characteristics influencing the evapotranspiration of forage cactus<sup>1</sup>. **Revista Ceres**, Viçosa – MG, v. 64, n.5, p. 465-475, set, 2017.

BASTIAANSSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**, Tese (Ph.D.), Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 273f., 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) In. **Formulation. Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212, n.1, p. 198-212, 1998a.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F.; Roerink, G. J.; Van Der Wal, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.p. 212-213, n.4, p. 213-229, 1998b.

BATISTA, W.R. M.; Netto, A.O. A.; Sousa, I.F. de; Britto, F. B.; Vasco, A.N. Aplicação do algoritmo SEBAL na análise da cobertura vegetal da Bacia hidrográfica do Rio Jacaré, Sergipe. **Revista de Geografia**, Recife - PE. v. 31, n. 2, 2014.

BERNARDO, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 596 p., 2008.

CARMO, J. F. A.; Moura, M. S. B.; Silva, T. G. F.; Souza, L. S. B.; Leitão, M. M. V. B. R. Balanço de energia e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar por dois métodos micrometeorológicos. **Agrometeoros**, Passo Fundo – RS, v.25, n.1, p.101-111, ago 2017.

CARVALHO, L. G. de; Rios, G. F. A.; Miranda, W. L.; Neto, P. C. Evapotranspiração de Referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia – GO, v. 41, n. 3, p. 456-465, jul. 2011.

CESNICK, Roberto. Melhoramento da cana-de-açúcar. Brasília-DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2004. 307p.

CORREIA, M. F.; Dias, M. A. F. S. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.1, p.157-168, 2003.

CUNHA, T. J. F.; Silva, F. H. B. B. da; Silva, M. S. L. da; Giongo, V.; Sa, I. B.; Oliveira Neto, M. B. de; Cavalcanti, A. C. Solos do Submédio do Vale do São Francisco: potencialidades e limitações para uso agrícola. (**Embrapa Semi-Árido. Documentos, 211**). Petrolina, 60 p., 2008.

DING, R.; KANG, S.; LI F.; ZHANGA, Y.; TONGA L.; SUN, Q. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in A maize field of northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 87-95, 2010

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar** / organização Celso Vainer Manzatto [et al.]. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 55 p.: il. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN: 1517-2627.2009.

ESTEVEZ, B. dos S.; Sousa, E. F. de; Mendonça, J. C.; Lousada, L. de L.; Muniz, R. de A.; Silva, R. M. da; Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, UFRPE – Pernambuco, v.7, n.4, p. 663-670, 2012.

ENTRAIGAS I.; Rivas, R.; Usunoff, E. Intercepción y Distribución de La Precipitación bajo El Canopeo de Maíz. **Revista de La Asociación Argentina de Agrometeorología**, Vol. 1, 2: p. 89-94.2001.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**, São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 97 p.

FUSHITA, A. T.; Reis, R. R.; Faresin, L.; Santos, J. E. Desempenho da classificação supervisionada em diferentes programas: comparação por meio do uso da terra e do índice de naturalidade da paisagem, **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu - PR, 2013.

GIONGO, P.R. Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto. 2011. 176 f. **Tese (doutorado) Universidade de São Paulo - Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**. 176 f., Piracicaba – SP, 2011.

GIONGO, P. R.; Moura, G. B. de A.; Silva, B. B.; Rocha, H, R. da; Medeiros, S. R. R.; Nazareno, A. C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado<sup>1</sup>. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande – PB, v.14, n.3, p.279–287, 2010.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A., Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande – PB, v.18, n.8, p.833–838, 2014.

GOMES, H. B; Silva, B. B. da; Cavalcanti, E. P.; Rocha, H. R. da. Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Revista Geociências**, Unesp - São Paulo, v.28, n.2, p. 153-164, 2009.

GOWDA, P. H.; Chavez, J. L.; Colaizzi, P. D.; Evett, S. R.; Howell, T. A.; Tolk, J. A. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science**, New York, v.26, n.2, p.223-237, 2008.

GNU. General Public License, **World Wide Web Electronic Publication**, <https://qgis.org/en/site/>.Rio de Janeiro, v. 2.8, 2017.

GUIMARÃES, C. M.; Stone, L.F.; Silva, A. C. L. Evapotranspiration and grain yield of upland rice affected by water deficit, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v.20, n.5, p.441-446, 2016.

INOUE, Y.; Moran, M. S. A simplified method for remote sensing of daily canopy transpiration—a case study with direct measurements of canopy transpiration in soybean canopy, **International Journal Remote Sensing**, 18, (1): p. 139-152, 1997.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING): Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.htm>. São José dos Campos, v.4, 2003.

KALMAN, J. D.; Mcvicar, T. R.; McCabe, M. F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remote sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, Oxford, v.29, n.1, p.421-469, 2008.

KIM, H. W.; Hwang, K.; Mu, Q.; Lee, S. O.; Choi, M. Validation of MODIS 16 Global Terrestrial Evapotranspiration Products in Various Climates and Land Cover Types in Asia. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v.16, p.222-238, 2012.

LILLESAND, T. M.; Kieffer, R. W.; Chipman, J. W. **Remote sensing and image interpretation**, 5ed, 763 p., New York: John Wiley & Sons, 2004.

LIRA, V. M. De. Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco. **Tese de Doutorado - Universidade Federal de Campina Grande - UFCG**, 2008.

MACHADO, C. C.; Silva, B. B.; Albuquerque, M. B.; Galvíncio, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens tm – landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de PERNAMBUCO, **Revista Brasileira de Meteorologia** v. v.29, n. n.1, p.55–67, 2014.

MARIN, F. Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado. Tese (Doutorado) 134 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP. 2003.

MELLO, J. L. P.; Sedyama, G. C.; Pruski, F. F.; Silva, D. E. **Evaporação e evapotranspiração**. Viçosa: UFV. 62p., 1996.

MENESES, P, R.; ALMEIDA, T. Distorções e Correções dos Dados da Imagem, In **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**, Cap. 6, p. 82-102, Universidade de Brasília UNB/CNPQ, Brasília - DF, 2012.

MENDONÇA, J. C.; Sousa, E. F de; André, R. G. B.; Silva, B. B. da; Ferreira, N. de J. Assessment of evapotranspiration in North Fluminense Region, Brazil, using Modis products and Sebal algorithm. In: Irmak, A. (org.). **Evapotranspiration - Remote sensing and modeling**. 1.ed. p.1-18. Rijeka: Intech, 2012.

MIRANDA, R. de Q.; Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B. de; Jones, C. A.; Srinivasan, R. Reliability of MODIS Evapotranspiration Products for Heterogeneous Dry Forest: A Study Case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, London, v. 2017, n. 2, p. 1-14, 2017.

MORAES, R. A.; Rocha, J. V.; Lamparelli, R. A. C. Determination of total accumulated rainfall, global radiation, evapotranspiration and degree-days originated from 62 the ECMWF model to sugar cane crop. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 2, p. 322–331, abr. 2014.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**, 4. ed, 422 p. UFV, Viçosa - MG, 2011.

MORSE, A.; Allen, R. G.; Tasumi, M.; Kramber, W. J.; Trezza, R.; Wright, J. Application of the SEBAL Methodology for Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Through Remote Sensing. **Final Report**, 220 p, 2001.

MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M.; GURGEL, M. T.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia na cana-de-açúcar irrigada no Submédio São Francisco. In: **Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, 27, 2007, Mossoró. Anais 1 CD-ROM. Mossoró RN : ABID, 2007.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**, 4, ed, Blucher, 2008, 363 p. São Paulo, 2010.



OLIVEIRA, T. H.; Galvíncio, J. D. Uso e cobertura do solo em áreas semiáridas do Nordeste do Brasil, **Revista de Geografia** (Recife), v. 28, p. 120-133, 2011.

OLIVEIRA, B. S.; Moraes, E. C.; Rudorff, B. F. T.; Mataveli, A. A. Análise do desempenho de modelos de albedo da superfície em áreas de cana-de-açúcar com dados do sensor MODIS/TERRA, **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro – RJ, N0 67/3 p. 479-491, mai 2015.

PEREIRA, A. R.; Villa Nova, N. A.; Sedyama, G. C. **Evapo(transpi)ração**. 183p., FEALQ, Piracicaba – SP, 1997.

RIVAS, R.; Caselles, V. A Simplified Equation to Estimate Spatial Reference Evaporation from Remote Sensing – Based Surface Temperature and Local Meteorological data. **Remote Sensing of Environment**, p. 68-76.2004.

RIGHI, E. Z. Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada. **Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, 168 f., Piracicaba– SP, 2004,

ROQUE, R. O.; Sansigolo, C. A. Estimativas de evaporação do lago Taquaruçu, SP pelo modelo conceitual de Morton. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.6, n.1, p.21-28, 2001.

RUHOFF, A. L.; Paz, A. R.; Aragao, L. E. O. C.; Mu, Q.; Malhi, Y.; Collischonn, W.; Rocha, H. R.; Running, S. W. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, Journal des Sciences Hydrologiques, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.83757858> (8)2013.

SHUTTLEWORTH, W.J. Putting the “vap” into evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (1), p. 210–244, 2007.

SILVA, B. B.; Feitosa, J. R.; Moura, S. B.; Galvíncio, J. D.; Costa, F. J. F. Balanço de radiação no Perímetro irrigado Senador Nilo Coelho utilizando técnicas de sensoriamento remoto e imagens Landsat 5-TM. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA XII, 2002 Foz do Iguaçu. Sociedade Brasileira de Meteorologia, CD-ROM 2002.

SILVA, L. D. B.; Folegatti, M. V.; Villa nova, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.

SILVA, T. G. F. Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. **Universidade Federal de Viçosa, Tese (doutorado)**. 176 f., Viçosa – MG, 2009.

SILVA, T. G. F. da; Moura, M. S. B. de; Zolnier, S.; Soares, J. M.; Vieira, V. J. de S.; Gomes Júnior, W. F. Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro in **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p. 1257-1265, Campina Grande - PB, 2011.

SILVA, T. G. F. da; Moura, M. S. B. de; Zolnier, S.; Carmo, J. F. A. do; Souza, L. S. B. de; Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco, **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 500-509, Fortaleza - CE, 2012.

SILVA, T. G. F. da; Moura, M. S. B. de; Zolnier, S; Souza, L. S. B. de. Sazonalidade do Controle de Evapotranspiração pela Cana-de-Açúcar Irrigada e Características Aerodinâmicas da Cultura no Semiárido brasileiro, **Revista Brasileira de Geografia FÍSICA**, v. 06, n.4, p. 621-634, Recife - PE, 2013.

SILVA, S.; Neto, J. D.; Teodoro, I.; Souza, J. L. de; Lyra, G. B.; Santos, M. A. L. dos. Water requirement of drip irrigated sugarcane in the Coastal Lands of Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 9, p. 849–856, set. 2015.

SILVA, R. G.; Teixeira, A. H. de C.; Freitas, J. L.; Furlan, S. N. Analysis of evapotranspiration and biomass in pastures with degradation indicatives in the Upper Tocantins River Basin, in Brazilian Savanna, **Revista Ceres**, v. 63, n. 6, p. 754-760, Viçosa - MG, 2016.

SOUZA, V. A. de; Roberti, D. R.; Alves, R. de C. M.; Diaz, M. D.; Tatsch, J. D.; Validação do Produto de Evapotranspiração MOD16 para uma cultura de Arroz Irrigado em Cachoeira do Sul – RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.38, p.270-276, 2016.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 169-184, 1998.

TASUMI, M.; Allen, R. G.; Trezza, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal Hydrologic Engineering**, Reston, v.13, n.2, p.51-63, 2008.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 94, p. 31-42, 2007.

TEIXEIRA, A. H. C.; Bastiaanssen, W. G. M.; Ahmad, M. D.; Bos, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultura land Forest meteorology**, Amsterdan, v. 18, n.2, 149, p. 462-476, 2009.

TEIXEIRA, A. H. de C., Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287–1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C.; Hernandez, F. B. T. ; Lopes, H. L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of land use changes in the semi-arid region of Brazil. Proceedings of SPIE - **International Society for Optical Engineering**, v. 8531, p. 85310P-1-85310P-9, 2012

TEIXEIRA, A. H. de C.; Bastiaanssen, W. G. M.; Five methods for interpret Field measurements of energy fluxes over a micro-sprinkler-irrigated mango orchard. **Irrigation Science**, v. 30, p 13-28, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C.; Lopes, H. L.; Hernandez, F. B. T.; Scherer-Warren, M.; Andrade, R. G.; Neale, C.M.U. Retrieving water productivity parameters by using Landsat images in the Nilo Coelho irrigation scheme, Brazil. Proceedings of SPIE -

**International Society for Optical Engineering**, v. 8887, p. 888713-1-888713-8, 2013.

TEIXEIRA, A. H. de C.; Hernandez, F. B. T.; Lopes, H. L.; Morris, S. W.; Bassoi, L. H.; A Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatiotemporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil, In: George G, Petropoulos. (Org.), **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**, 1ed, Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis. p. 165-187, 2014.

TODD, R. W.; Evett, S. R.; Howell, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultura land Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 335–348, 2000.

TUCCI, E. M. (org) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª edição. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007.

UDA, P.K.; Evapotranspiração Real da Bacia do Rio Iguaçu por meio do modelo METRIC. **Tese (doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina**, 178 f, 2016.

VAN HELLMONT, Q.; Ruddick, K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 145, n.7, p. 105–115, 2014.

WARREN, M. S.; Teixeira, A. H. C.; Rodrigues, L.N.; Hernandez, F. B. T. Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.7, n.01 p. 65-82, 2014.

## Anexos

**Anexo 1** - Parâmetros meteorológicos utilizados na modelagem do para as datas das imagens utilizadas na modelagem do SAFER.

Data	Rg MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	T (ar) °C	UR (ar) %	V (vento) m s <sup>-1</sup>	P mm dia <sup>-1</sup>	ET0 mm dia <sup>-1</sup>
24/08/2015	25,39	26,64	44,77	10,71	0,00	6,52
09/09/2015	25,98	28,13	47,67	10,39	0,00	7,23
25/09/2015	26,96	29,00	42,69	10,36	0,00	7,53
11/10/2015	29,85	27,34	45,78	12,13	0,00	8,48
27/10/2015	29,51	29,03	38,63	10,81	0,00	8,52
12/11/2015	29,34	29,35	37,36	9,46	0,00	7,78
14/12/2015	30,42	30,40	41,17	13,26	0,00	8,61
03/03/2016	26,21	28,54	55,33	7,60	0,00	4,55
06/05/2016	23,76	28,25	48,19	9,45	0,00	4,10
22/05/2016	23,13	27,91	47,15	9,42	0,00	5,10