

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**USO DO ALGORITMO SAFER PARA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA CULTURA DA SOJA**

Yane de Freitas da Silva

Engenheira Agrônoma

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**USO DO ALGORITMO SAFER PARA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA CULTURA DA SOJA**

Yane de Freitas da Silva

Orientador: Prof. Dr. José Renato Zanini

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2018

Silva, Yane de Freitas da
S586u Uso do algoritmo SAFER para evapotranspiração real na cultura da
soja / Yane de Freitas da Silva. -- Jaboticabal, 2018
xii, 57 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018
Orientador: José Renato Zanini
Banca examinadora: Alexandre Barcellos Dalri, João Luis Zocoler
Bibliografia

1. Balanço de energia. 2. Consumo de água. 3. *Glycine max*. 4.
Irrigação. 5. Modelagem hídrica. 6. Sensoriamento remoto. Título. II.
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.34:528.8

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: USO DO ALGORITMO SAFER PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA CULTURA DA SOJA.

AUTORA: YANE DE FREITAS DA SILVA

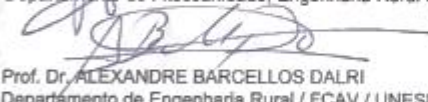
ORIENTADOR: JOSÉ RENATO ZANINI

COORIENTADOR: LUIZ FABIANO PALARETTI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ RENATO ZANINI
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. JOÃO LUIS ZOCOLER
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 26 de janeiro de 2018

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Yane de Freitas da Silva – Brasileira nascida em 30 de junho de 1990 na cidade de São Joaquim da Barra, SP. Filha de Eurípedes dos Reis da Silva e Idair Aparecida Donizete de Freitas. Ingressou em agosto de 2009 no curso de Agronomia na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira/SP. Durante o período de graduação desenvolveu trabalhos na área de Melhoramento Genético e posteriormente na área de Irrigação e Drenagem sob orientação do Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez; foi monitorana disciplina por um semestre e desenvolveu projeto de extensão com monitoramento de estações agrometeorológicas. Em novembro de 2014 obteve o título de Engenheira Agrônoma, trabalhou durante 19 meses em uma empresa de irrigação, com o desenvolvimento de projetos de pivô central, coordenação de obras e vendas de sistemas de irrigação. Em agosto de 2016 iniciou o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal/SP, na linha de pesquisa de Engenharia de Água e Solo, sob orientação do Prof. Dr. José Renato Zanini, desenvolvendo pesquisas com uso de imagem de satélite para a quantificação da evapotranspiração da soja.

“...Não é a quantidade de água aplicada a uma cultura, e sim a quantidade de inteligência aplicada, que determina o resultado – em todos os casos está mais relacionado a inteligência do que a água...” –Alfred Deakin.

DEDICO

Aos meus pais, **Eurípedes dos Reis da Silva** e **Idair Aparecida Donizete de Freitas**, pela base e apoio dado em mais esta etapa e acima de tudo pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por esta oportunidade de viver e a cada dia adquirir mais conhecimento para entender e admirar suas criações.

Aos meus pais, Eurípedes e Idair, por sempre estarem ao meu lado, aceitarem as minhas escolhas, apoiarem as minhas decisões, pela paciência, por terem se privado para proporcionar o melhor, e por todos seus esforços. Nunca conseguirei agradecer o suficiente, nem demonstrar minha admiração por vocês!

Aos meus irmãos, Fransérgio e Elias, pelo carinho, incentivo e suporte constante no decorrer da vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Renato Zanini, pela orientação, pela paciência, pelos ensinamentos, e pela confiança a mim depositada.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti, por todo o conhecimento compartilhado, por todas as contribuições e auxílio na minha pesquisa.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias -FCAV , pela oportunidade e pela excelência em qualidade de ensino que me foi passada durante o mestrado. Aos funcionários desta instituição pela colaboração direta ou indireta no meu trabalho.

Às minhas amigas Ipuã, Tuany, Jaqueline, Bárbara e Tharcila, pela compreensão e amizade mesmo nos momentos em que estava ausente.

À minha melhor amiga, Stella, pelo companheirismo, paciência, pelas valiosas discussões e atenção dedicada em um momento tão desafiador.

Às minhas amigas que dividiram a vida e o apartamento comigo em Jaboticabal, Jennifer, Lorena e Carol, me ajudando no experimento e nas horas mais difíceis passadas.

Aos amigos da graduação, Micaella, Jaqueline, Poliana, Giseli, Bruno e Patrick, como sempre digo “presentes que Ilha Solteira me deu”.

Ao Douglas, por ser mais um irmão na minha vida, pelas conversas que duram horas e pela amizade.

Aos amigos que mesmo de longe, auxiliaram com todos seus conhecimentos durante meu mestrado, Diego, Daniel e principalmente Renato, pelas

ajudas, opiniões, sugestões e conselhos dados para melhoria deste trabalho, só tenho que agradecer por ter vocês.

Ao meu trio ternura, Branca, Paulo e Thiago, pelo companheirismo, pelo acolhimento durante esse período e estiveram presentes tanto nos bons quanto nos maus momentos sempre dando apoio, e claro, pelos cafés.

Aos amigos que fiz na FCAV, Robson, Patrick, Gustavo, Katharine, Gustavo, Elder, Jardel, Jonathan, Amanda, Aline e Grenda, só tenho que agradecer pelo apoio nos momentos mais tensos.

À Kamila Menezes, pelo apoio espontâneo e pela gentileza em ajudar nos gráficos e na discussão dos mesmos.

Ao João Bettiol, desde Ilha Solteira até Jaboticabal, pelo apoio incondicional, incentivo, discussões técnicas e acima de tudo pela amizade e consideração recíproca.

Aos amigos do grupo de recursos hídricos, João, Izabella e principalmente Miquéias, obrigada pela ajuda, pela paciência e pelas caronas.

À minha banca examinadora, Alexandre Dalri e João Zocoler, pela imensa contribuição no trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo enquanto estive em Jaboticabal.

A todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Enfim agradeço a todos os dias terem começado com desafios e terminado com a sensação de dever cumprido, e a garra conseguida às vezes não sei de onde, para vencer todas as dificuldades e chegar até aqui.

...O MEU MUITO OBRIGADA!

“Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”

(Isaac Newton)

SUMÁRIO

RESUMO.....	2
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	6
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Botânica, importância e fatores que influenciam no cultivo da soja .	3
2.2. Demanda hídrica.....	5
2.3. Déficit hídrico.....	6
2.4. Evapotranspiração da cultura	9
2.5. O algoritmo SAFER e suas aplicações	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1. Localização e caracterização do solo e clima.....	18
3.2. Aquisição das imagens.....	19
3.3. Evapotranspiração real com o uso do método tradicional e SAFER	19
3.4. Processamento.....	21
3.4.1. Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância...	21
3.4.2. Cálculo de reflectância	22
3.4.3. Albedo no topo da atmosfera.....	23
3.4.4. Albedo de superfície	23
3.4.5. Temperatura de superfície	23
3.4.6. Saldo de radiação.....	24
3.4.7. Índice de vegetação de diferença normalizada - NDVI.....	25
3.5. Avaliação dos resultados obtidos	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Albedo de superfície	28
4.2. NDVI.....	31
4.3. Temperatura de superfície.....	34
4.4. Saldo de radiação	39
4.5. Evapotranspiração real	42
5. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS.....	48

USO DO ALGORITMO SAFER PARA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA CULTURA DA SOJA

RESUMO -A soja é uma das culturas mais importante na economia mundial, originária de clima temperado, adapta-se bem em uma faixa de 20 a 35 °C e a necessidade total de água para a cultura é em torno de 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, manejo da cultura e duração do ciclo. O conhecimento sobre a temperatura de superfície, o saldo de radiação e a evapotranspiração da cultura em cada fase fenológica é a base para o dimensionamento de sistemas de irrigação e gerenciamento eficiente da água. Desse modo, o objetivo do trabalho foi estimar o albedo de superfície, o NDVI, o saldo de radiação, a temperatura de superfície e a evapotranspiração real da soja, aplicando o algoritmo “Simple Algorithm Model For Evapotranspiration Retrieving”- SAFER comparado com o método FAO 56, fazendo uso de técnicas de sensoriamento remoto e das variáveis climáticas obtidas em estação agrometeorológica. Constatou-se que o valor médio do albedo de superfície calculado pelo SAFER para todo o ciclo da soja foi de 18%.As áreas com valores de NDVI próximos a 0,8 espera-se maiores produtividades, podendo ser gerados mapas que auxiliarão de forma qualitativa. A temperatura de superfície estimada pelo SAFER apresentou valores bem próximos aos medidos pela estação agrometeorológica. Os maiores valores de saldo de radiação foram encontrados nas fases de pleno desenvolvimento, enquanto que os menores ocorreram em fase próxima a colheita e solo exposto. A ETr média estimada pelo SAFER apresentou redução de 1,91 mm dia⁻¹ comparada com o método FAO 56.

Palavras-chave: balanço de energia, consumo de água, *Glycine max*, irrigação, modelagem hídrica, sensoriamento remoto

USE OF SAFER ALGORITHM FOR REAL EVAPOTRANSPIRATION IN SOYBEAN CROP

ABSTRACT -Soybean is one of the most important crops in the world economy, coming from temperate climate, well adapted in a range of 20 to 35 °C and the total water requirement for the crop is around 800 mm/cycle, depending on the climate conditions, crop management and cycle duration. Knowledge about surface temperature, radiation balance and evapotranspiration of the crop in each phenological phase are the basis for the operation of water efficient irrigation systems. Thus, the objective of this work was to estimate the surface albedo, the NDVI, the balance of radiation, the surface temperature and actual evapotranspiration of soybean applying the algorithm "Simple Algorithm Model For Evapotranspiration Retrieving" - SAFER compared to model FAO 56, using remote sensing techniques and of the climatic variables obtained in agrometeorological station. It was observed the average value of the surface albedo calculated by SAFER for the entire soybean cycle was 18%. Areas with NDVI values close to 0.8 expected higher yields, and maps can be generated that will help in a qualitative way. The surface temperature estimated by SAFER was very close to that measured by the agrometeorological station. Analyzed only by phenological phases, the highest values of radiation balance were found in the phases of full development while the smaller ones, in the near phase the harvest and exposed soil. The mean ETr estimated by SAFER presented a reduction of 1.91 mm day⁻¹ compared to the FAO 56 method.

Keywords:energy balance, water consumption, *Glycine max*, irrigation, water modeling, remote sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do ciclo vegetativo da soja	4
Figura 2. Curva Generalizada de Kc para a soja, segundo a FAO,1998.....	14
Figura 3. Mapa de localização da área de estudo em Jaboticabal - SP	18
Figura 4. Fluxograma das etapas do SAFER utilizando temperatura de superfície, albedo de superfície e NDVI.....	21
Figura 5. Dados agrometeorológicos coletados na estação no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal - SP.	27
Figura 6. Distribuição espacial dos valores diários de albedo de superfície em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.	28
Figura 7. Albedo de superfície versus NDVI para a cultura da soja no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 para Jaboticabal - SP.	29
Figura 8. Comparação do albedo de superfície (α_0) com o saldo de radiação (R_n) no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 na cultura da soja em Jaboticabal – SP.	30
Figura 9. Histograma de distribuição de pixel para o albedo no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.....	31
Figura 10. Distribuição espacial dos valores diários de NDVI em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.	33
Figura 11. Histograma de distribuição de pixel para o NDVI no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.....	34
Figura 12. Distribuição espacial dos valores diários de temperatura de superfície em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.	35
Figura 13. Histograma de distribuição de pixel para a temperatura de superfície no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.	36
Figura 14. Regressão linear simples de temperatura de superfície do SAFER versus a temperatura medida pela estação agrometeorológica para a cultura da soja no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 para Jaboticabal - SP.	38

Figura 15. Distribuição espacial dos valores diários de Saldo de Radiação em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.	39
Figura 16. Histograma de distribuição de pixel para o saldo de radiação no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.....	41
Figura 17. Distribuição espacial dos valores diários de Evapotranspiração real pelo SAFER em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.	43
Figura 18. Regressão de evapotranspiração real versus evapotranspiração da cultura para a soja no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 para Jaboticabal - SP..	45
Figura 19. Histograma de distribuição de pixel para a evapotranspiração real no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.	45
Figura 20. Interação da ETr em função das variáveis TS (temperatura de superfície), NDVI, albedo e Rn (Saldo de radiação) para a cultura da soja em Jaboticabal -SP.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Evapotranspiração (ETP) total e média diária em sub-períodos do ciclo da soja.....	10
Tabela 2. Datas das imagens do Landsat 8, Dia Juliano (DOY), Fase da cultura (FC), Tempo local (TL - h), Ângulo de elevação do Sol (ES - °), Distância Sol-Terra(ST), Azimuth Sol (AZ - °), Temperatura do ar (Ta-°C), Umidade relativa (Ur-%), Pressão atmosférica (Pa-kPa), no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP	19
Tabela 3. Descrição das bandas do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).....	22
Tabela 4. Coeficientes para o cálculo do albedo planetário para cada banda do Landsat 8.....	23
Tabela 5. Valores médios da temperatura na superfície terrestre (TS) estimada pelo SAFER, temperatura medida pela estação (Tar), fase da cultura (FC), dia juliano da imagem (DOY), erro absoluto (Ea) e erro relativo (Er) em diferentes datas de passagem do sat satélite na cultura da soja no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.....	38
Tabela 6. Valores médios do saldo de radiação(Rn SAFER) estimado pelo SAFER, saldo de radiação medido pela estação (Rn est.), fase da cultura (FC), dia juliano da imagem (DOY), erro absoluto (Ea) e erro relativo (Er) em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.....	40
Tabela 7. Valores médios da evapotranspiração real (ETr), evapotranspiração da cultura (ETc), fase da cultura (FC), dia juliano da imagem (DOY) e coeficiente de	

cultura estimado pela FAO 56 (Kc), em diferentes datas de passagem do satélite na	
cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal	
- SP.	44

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma leguminosa de ciclo anual de 90 dias (precoce) a 160 dias (tardia) originária do nordeste asiático. É uma planta subtropical, mas com o melhoramento genético, pode ser cultivada até a latitude de 52°(CAVALETT,2008). No Brasil, o grão foi introduzido no estado do Rio Grande do Sul por volta de 1960 e até meados de 1970, cerca de 80% da produção nacional de soja concentrava-se na região Sul(SCHNEPF; DOHLMAN; BOLLING, 2001). O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, atrás apenas dos EUA. Na safra 2016/2017, a cultura ocupou área de 33,25 milhões de hectares, o que totalizou produção de 113,9milhões de toneladas(CONAB, 2017).

Na produção da soja, a disponibilidade hídrica é o principal limitante da cultura, sendo a precipitação pluvial em muitas safras não suficiente para o atendimento da demanda potencial da cultura, prejudicando a aeração do solo, favorecendo o ataque de pragas e diminuindo a incidência de radiação devido aos dias nublados, podendo ainda dificultar a colheita. A disponibilidade de água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Durante o primeiro período, tanto o excesso quanto o déficit de água são prejudiciais à obtenção de boa uniformidade na população de plantas a 50%.O manejo de irrigação tem que ser controlado até em regiões chuvosas, podendo assim salvar a produção em situações de pequeno ou grande período de estiagem dentro do ciclo (GAVA, 2014).

A necessidade de água na soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após esse período (EMBRAPA, 2008).

Déficits hídricos expressivos, durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na soja, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como consequência, causam a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando em redução do rendimento de grãos (EMBRAPA,2013).

Com a crescente demanda mundial por alimentos e o potencial de expansão das áreas agrícolas chegando ao fim, é necessário o investimento em tecnologias que

contribuam para o “aumento vertical” da agricultura, melhorando ao máximo a produtividade das áreas existentes. Juntamente com as políticas públicas de uso dos recursos hídricos, a utilização correta da irrigação de forma a manejar eficientemente a água, os fertilizantes e outros insumos, é essencial para a manutenção do suprimento de alimentos, em equilíbrio com a sua crescente demanda, garantindo a conservação do meio ambiente. Dessa forma, o estudo de princípios básicos para a realização de bom manejo de água e fertilizantes é imprescindível para que a agricultura irrigada possa ser sustentada pelo meio ambiente, garantindo também a redução da utilização de água e energia elétrica pelos sistemas, sem prejudicar a produtividade.

É importante quantificar o consumo de água das plantas em sistemas irrigados para otimizar e também automatizar o fornecimento de água para elas. O uso da água pelas comunidades vegetais é um parâmetro importante a ser considerado nos estudos de regionalização agrícola ou na avaliação da produtividade das culturas. Uma forma pela qual o consumo hídrico (evapotranspiração) pode ser estimado é pelo balanço de energia da superfície, por meio de métodos que estimam a evapotranspiração usando o sensoriamento remoto. O “Simple Algorithm model For Evapotranspiration Retrieving” (SAFER) é um sistema de monitoramento de evapotranspiração usando sensoriamento remoto, tem como vantagem a simplicidade de aplicação, com ausência de necessidade de classificação de cultivares e espaçamentos utilizados, com a vantagem adicional da possibilidade de usar dados meteorológicos diários de estações meteorológicas convencionais ou automáticas.

Partindo da hipótese que o algoritmo SAFER é um método rápido e prático para determinação da evapotranspiração, podendo-se, calcular a necessidade de água para as diferentes fases fenológicas da cultura, o objetivo deste trabalho foi estimar a evapotranspiração real da soja, o saldo de radiação e a temperatura de superfície, aplicando o algoritmo SAFER (TEIXEIRA, 2012) comparado com o FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Botânica, importância e fatores que influenciam no cultivo da soja

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é uma planta C3, herbácea, da ordem Dicotyledoneae, família Leguminosae, subfamília das Papilionoideae, gênero *Glycine* L. Possui dois ciclos distintos em seu desenvolvimento, o vegetativo (período compreendido da emergência da plântula até a abertura das primeiras flores) e o reprodutivo (início da floração até o final do ciclo). Os ciclos variam entre 90 a 165 dias e podem ser considerados desde precoce a tardio, dependendo da região cultivada. A planta de soja é fortemente influenciada pelo comprimento do dia; em locais de fotoperíodo mais curto a fase vegetativa tende a induzir florescimento precoce.

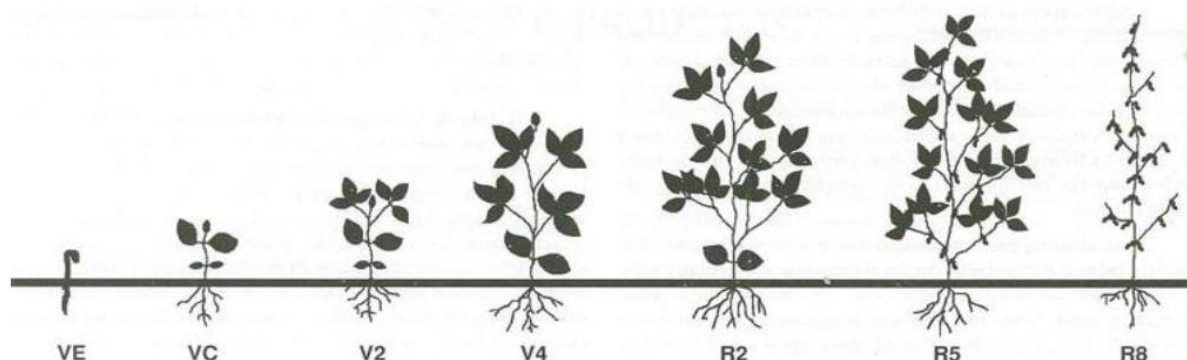
A cultura é originária do extremo oriente, foi introduzida nos Estados Unidos em 1765 e teve início no Brasil na Bahia em meados de 1882, seguido por São Paulo em 1891 chegando ao Rio Grande do Sul no ano de 1914, sendo de melhor adaptação nesse estado, devido as cultivares utilizadas serem as mesmas oriundas dos EUA. Originariamente, a soja é uma planta subtropical, mas com o melhoramento genético, pode ser cultivada hoje até altas latitudes.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, seu clima favorece o plantio em várias regiões do país. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a produção mundial de soja na safra 2016/2017 foi de 351,3 milhões de toneladas, com área de 121 milhões de hectares, o Brasil tem 113,9 milhões de toneladas dessa produção. Os estados brasileiros de maior produção são: Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, com 31,20 e 19 milhões de toneladas, respectivamente.

No estudo do ciclo fenológico da soja, a duração do ciclo vegetativo da cultura da soja pode ser relacionada em termos de exigências bioclimáticas, a partir da temperatura do ar. Considerada sob diferentes aspectos, desde a simples soma de unidades térmicas ou graus-dia, a temperatura vai determinar o tempo que determinada planta precisará para atingir certo grau de maturidade, da emergência à maturação (PICINI, 1998; SCHÖFFEL; VOLPE, 2002). O ciclo, em geral, pode

diminuir em locais onde as temperaturas são mais elevadas devido ao acúmulo rápido de energia (CAMARGO, 2006).

O ciclo da fenologia da soja (Figura 1) permite identificar e agrupar os estádios de desenvolvimento da cultura e relacioná-los com suas necessidades específicas no decorrer do ciclo. O estágio vegetativo (V) se inicia desde a semeadura até o florescimento (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). As subdivisões da fase vegetativa são representadas numericamente como V1, V2, V3, até Vn, menos os dois primeiros estádios que são designados como VE (emergência) e VC (estádio de cotilédones) (RITCHIE; THOMPSON; BENSON, 1997). O estágio vegetativo denominado VE representa a emergência dos cotilédones, isto é, uma plântula recém-emergida é considerada em VE. Uma planta pode ser considerada emergida quando se encontra com os cotilédones acima da superfície do solo e os mesmos formam um ângulo de 90°, ou maior, com seus respectivos hipocótilos (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).



Fonte: Iowa State University. Special Report n.53,1998.Utilizado por CÂMARA (1998).

Figura 1. Esquema do ciclo vegetativo da soja.

O estágio vegetativo, denominado VC, representa o estágio em que os cotilédones se encontram completamente abertos e expandidos. Uma planta é considerada em VC quando as bordas de suas folhas unifolioladas não mais se tocam (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

A fase reprodutiva da soja, que compreende o florescimento, desenvolvimento dos legumes, enchimento de grãos e maturação (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005), é representada pela letra R e apresenta oito subdivisões ou estádios.

A soja possui cultivares com dois hábitos de crescimento, o crescimento determinado e o indeterminado, que é baseado de acordo com características do ápice do caule principal (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

As cultivares de hábito de crescimento determinado tem plantas com caules terminados por racemos florais, após o início do florescimento, onde as plantas aumentam muito pouco de altura (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

Já as cultivares de hábito de crescimento indeterminado não apresentam racemos florais terminais e continuam desenvolvendo nós e alongando o caule, de forma que continuam a incrementar a altura até o final do florescimento (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005).

As condições ótimas de temperatura para a cultura da soja estão entre 20°C e 30°C, sendo a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento em torno de 30 °C (SMIDERLE et al., 2009; EMBRAPA, 2011; FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). A faixa de temperatura do solo adequada para semeadura varia de 20°C a 30°C, sendo 25°C a temperatura ideal para rápida e uniforme emergência das plântulas (SMIDERLE et al., 2009; EMBRAPA, 2011).

O crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo em ambientes que as temperaturas são menores ou iguais a 10°C. Acima de 40°C ocorre efeito adverso na taxa de crescimento provocando danos na floração e diminuindo a capacidade de retenção de vagens (SMIDERLE, et al., 2009; EMBRAPA, 2011; FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

2.2. Demanda hídrica

A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos do protoplasma, seu movimento na planta é resultante de um gradiente potencial que contribui para a translocação dos solutos absorvidos ou sintetizados pela raiz, dos compostos transportados até a folha (AWAD; CASTRO, 1992; FLOSS, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2004; EMBRAPA, 2009; ARAUJO, 2010).

A variação interanual de produtividade da soja é uma função mais hídrica do que térmica. Segundo Moraes (1998), a importância de conhecer os efeitos da

deficiência hídrica sobre as culturas para que se possam minimizar os danos ocasionados pela falta de água, os efeitos da deficiência hídrica sobre a produtividade de uma cultura vão depender da sua intensidade, duração, época e ocorrência e da interação com outros fatores determinantes da expressão da produtividade final (CUNHA; BERGAMASCHI,1992).

O estresse hídrico na floração e no enchimento dos grãos pode ocasionar problemas fisiológicos graves que ocasionam queda prematura de folhas e consequentemente redução de produtividade, tendo como exigência de 7 a 8 mm·dia⁻¹. A necessidade de água durante todo o ciclo para um rendimento máximo varia de 450 a 800 mm dependendo do manejo da cultura, do clima e da cultivar empregada.

No manejo da irrigação via solo é importante conhecer a profundidade do sistema radicular para definir a camada de solo a ser considerada. No caso da soja as raízes funcionais chegam a profundidades que variam de 10 a 15 cm (HERNANDEZ, 2002).

A irrigação permite que a soja seja cultivada na safrinha, para produção de sementes ou como rotação de culturas. Em alguns estados como Mato Grosso e Goiás essa prática é proibida devido ao vazio sanitário, período de 90 dias que visa reduzir o inóculo do fungo *Phakopsora pachyrhizi*, minimizando o número de aplicações de fungicidas para o controle no período vegetativo. Uma das vantagens de áreas irrigadas é não haver competição entre as plantas por suprimento de água.

2.3. Déficit hídrico

O déficit hídrico em áreas não irrigadas é uma das principais causas de perdas agrícolas, pois frequentemente ocorrem verânicos e estiagens, principalmente na safra de verão, com grande demanda evapotranspirativa e distribuição irregular das chuvas. O déficit hídrico causa perda de produtividade em qualquer fase da cultura. Neumaier, Nepomuceno e Farias (2000) destacam que a soja pode apresentar efeito compensatório quando há redução no número de legumes por planta, dependendo do potencial genético da cultivar, e tem condições climáticas favoráveis nas fases posteriores.

Os dois períodos mais sensíveis da soja à falta de água no solo são germinação e enchimento de grãos porque envolvem diretamente a formação dos componentes do rendimento (CASAGRANDE et al., 2001; EMBRAPA, 2002). Excesso ou deficiência hídrica entre esses períodos retardam o crescimento vegetativo e prejudicam a obtenção de boa uniformidade na população de plantas. Contudo, deficiências hídricas após o início do florescimento (R1-R2) e no período de frutificação (R3-R5) podem causar alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e enrolamento de folhas, provocando queda prematura de folhas, abortamento de flores e queda de vagens, reduzindo significativamente a produtividade. A deficiência hídrica durante o florescimento (R1-R3) reduz o número total de vagens, enquanto a deficiência hídrica durante a fase de formação da semente ou enchimento de vagens (R5), resulta em menor número de grãos por vagem, sendo considerada a fase mais sensível à carência hídrica (CAMARGO, 1984).

A necessidade de se produzir com qualidade e em maior quantidade e a diminuição dos impactos ambientais negativos sobre o recurso natural “água” exigem, da comunidade científica, novos conhecimentos sobre as reais necessidades hídricas das culturas (REIS et al., 2007; MORAIS et al., 2008; SANTANA et al., 2009).

A deficiência hídrica no início do ciclo da soja causa forte redução na emissão de novos ramos reduzindo de forma potencial o número de nós que iriam produzir legumes, porém a planta pode se recuperar parcialmente caso haja melhor disponibilidade de água após o florescimento, pois, pode emitir e fixar maior número de flores nos nós para produzir legumes, mas sofre falta de novas folhas para sustentar o enchimento de grãos. Com boa disponibilidade de água no período vegetativo, mas com falta no florescimento e início de formação dos legumes caracteriza-se uma situação dramática para a lavoura, sendo esse o período mais sensível da planta ao déficit, pois os efeitos se darão sobre o abortamento de flores, óvulos e legumes e, posteriormente, sobre o tamanho dos grãos.

A soja pode ser considerada uma cultura tolerante à deficiência hídrica, por possuir período de florescimento longo, permitindo que escape de secas de curta duração, compensando a perda de flores ou legumes com o aparecimento de flores

tardias por ocasião de condições mais adequadas de umidade no solo (MOTA,1983).No entanto, a deficiência hídrica submete a planta da soja a estresse que se manifesta na forma de baixa estatura, folhas pequenas e murchas, entrenós curtos, redução na taxa de crescimento de cultura, menor índice de área foliar, menor taxa de expansão foliar, atividade fotossintética menos intensa, prejuízos à fixação de nitrogênio, e por influir no metabolismo geral da planta, acaba afetando negativamente o rendimento de grãos (CONFALONE; COSTA; PEREIRA, 1998; DESCLAUX; HUYNH; ROUMET,2000; NEUMAIER; NEPOMUCENO; FARIAS,2000).

Secas durante o período reprodutivo (pós-florescimento) causam reduções drásticas no rendimento de grãos, devido ao maior abortamento de flores e de legumes, menor período de florescimento, menor número de grãos por legume, menor período de enchimento de grãos, diminuição de qualidade de grãos e aceleração da senescência foliar. Essas perdas, e algumas ocasiões, acabam não sendo compensadas pelo número de grãos por legume e pelo peso do grão, pois esses componentes de rendimento possuem limites máximos determinados geneticamente (SIONIT; KRAMER,1977; DE SOUZA; EGLI; BRUENING, 1997;CONFALONE;DUJMOVICK,1999;DESCLAUX;HUYNH; ROUMET,2000; NEUMAIER; NEPOMUCENO; FARIAS,2000).

Fietz e Urchei (2002), ao estudarem a deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados/MS, constataram que de maneira geral, a soja semeada em novembro apresentou maior deficiência hídrica que a semeada em dezembro. Na semeadura em novembro, os maiores déficits hídricos ocorreram no estágio do segundo nó ao início do florescimento, enquanto na semeadura de dezembro as maiores deficiências de água ocorreram no início do florescimento ao início do enchimento de grãos. Houve deficiência hídrica em todos os subperíodos da cultura, em todas as safras e em ambas as épocas de semeadura. Segundo eles a ocorrência de déficit hídrico é uma das principais causas de perdas agrícolas na região, pois na safra de verão ocorrem, com frequência, veranicos e estiagens, devido à grande demanda evapotranspirativa e pela distribuição irregular das chuvas.

Se por um lado a falta de água traz prejuízos à cultura, o excesso também é prejudicial. Segundo Doorenbos e Kassam (1994), o teor de água no solo, durante a germinação, não deve exceder 85% nem ficar abaixo de 50% da água disponível. Segundo os autores, esse seria o nível permíssível para o manejo da irrigação em condições médias de evapotranspiração (5 a 6 mm/dia).

Ao estudar a captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas, Santos et al. (2003) definiram que a soja apresentou a maior taxa de produção de biomassa seca total ao longo do seu ciclo e também o maior índice de área foliar evidenciando sua maior capacidade em captar luz e em sombrear plantas competidoras. A soja apresentou maior eficiência em converter a radiação interceptada em biomassa.

Ao pesquisar a influência do “déficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja, Confalone e Navaro (1999) concluíram que deficiência hídrica provoca a diminuição do índice de área foliar em tratamentos sem irrigação, com relação ao irrigado, o que afetou a captura de radiação em condições de deficiências hídricas. Quando é exposta a estresse hídrico leve, a soja tende a maximizar a eficiência de utilização da radiação e a diminuir a eficiência de interceptação da radiação solar fotossinteticamente ativa. O déficit hídrico severo reduz a eficiência de utilização da radiação. O déficit hídrico produz um efeito diferencial sobre o crescimento e produção de biomassa na cultura da soja, segundo o momento e a severidade do estresse.

2.4. Evapotranspiração da cultura

O clima é fundamental no planejamento agrícola, seja ele em macro ou micro escala uma vez que é o elemento de mais difícil controle, manejo e gerenciamento, num território de características tropicais como o Brasil. Portanto, para a determinação das exigências climáticas de uma determinada cultura, há a necessidade de que os estudos agrometeorológicos sejam complementados com observações fenológicas (CAMARGO, 1984).

Segundo Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009), um dos principais fatores de risco para qualquer atividade agrícola é o clima, sendo que dentre as variáveis

climáticas que interferem na produtividade destacam-se a precipitação, a temperatura do ar e a radiação solar. A variabilidade temporal das condições climáticas regionais, notadamente na zona tropical, como é o caso de grande parte do território brasileiro, manifesta-se na forma de forte irregularidade pluviométrica (mensal e sazonal), uma vez que sua distribuição implica em consequências ambientais e socioeconômicas muito relevantes (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

O termo evapotranspiração foi proposto por Thornthwaite e Holman (1944) para representar ambos os processos, evaporação e transpiração, que ocorrem de maneira natural e simultânea em uma superfície vegetada (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A evapotranspiração é fortemente influenciada por fatores de vegetação, fatores de manejo do solo e gestão das condições ambientais e, principalmente, por parâmetros que dizem respeito ao tempo (ALLEN et al., 1998; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002)

Os elementos de tempo que oferecem maior impacto nesse processo são: radiação solar, temperatura de superfície, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Os fatores ligados à vegetação também têm grande parcela de influência no processo de evapotranspiração. Em estudos de quantificação de evapotranspiração (Tabela 1), principalmente em atividades de agricultura irrigada, a espécie vegetal deve ser levada em consideração uma vez que variáveis como a arquitetura foliar (distribuição espacial da folhagem, resistência interna da planta ao transporte de água e outros fatores morfológicos como número, tamanho e distribuição de estômatos) diferem de planta para planta (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Isso é determinante na necessidade hídrica de cada espécie de cultura durante os estádios de crescimento (KLOCKE et al., 1996).

Tabela 1. Evapotranspiração (ETP) total e média diária em sub-períodos do ciclo da soja.

Sub-períodos de desenvolvimento	ETP total	ETP diária
		mm.....

Semeadura-Emergência	16	2,2
Emergência-Início do florescimento	266	5,1
Início do florescimento – Início da formação de legumes	160	7,4
Início da formação de legumes – Maturação fisiológica	362	6,6
Maturação fisiológica – Maturação de colheita	36	3,7
Ciclo	840	5,8

Fonte: Berlato e Bergamaschi (1979)

Outro fator relacionado à planta que também tem levado em consideração é o albedo da vegetação. Este fator influencia diretamente na disponibilidade do saldo de radiação para o processo, pois quanto mais escura for a vegetação, menor será a reflexão dos raios solares incidentes, conseqüentemente maior a absorção, e maior será o saldo de radiação (PEREIRA;ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Ainda de acordo com os pesquisadores, a intensidade da evapotranspiração também é função da profundidade do sistema radicular da planta (pois quanto maior for o sistema radicular maior é o volume de solo explorado pelas raízes, visando o atendimento da demanda hídrica da atmosfera), da altura e da rugosidade da planta (pois plantas mais altas e mais rugosas interagem mais eficientemente com a atmosfera em movimento, extraíndo mais energia do ar, contribuindo para o aumento da evapotranspiração).

Portanto, a evapotranspiração é um dos mais importantes componentes mediadores do clima e do tempo, tanto em escala global quanto local, consistindo da ligação entre energia, clima e hidrologia. Estima-se que, por meio da evapotranspiração global, aproximadamente 62% do volume precipitado sobre os continentes retorne à atmosfera (DINGMAN, 2002), fato que lhe confere o status de agente regulador fundamental das disponibilidades hídricas, superficiais e subterrâneas.

A determinação da ETo é um problema compartilhado por várias ciências que estudam o sistema solo-planta-atmosfera. Devido à necessidade de se conhecer a perda d'água de superfícies vegetadas, vários pesquisadores desenvolveram métodos de estimativa da ETo, havendo vários métodos sendo que muitos têm aceitação quase que unânime, enquanto outros são bastante criticados e até

desprezados, seja pela ausência das variáveis necessárias para a sua implementação, ou ainda devido à imprecisão associada.

A ETo pode ser obtida por medidas diretas ou por estimativas. As medidas diretas feitas em lisímetros ou estações meteorológicas, usando correlações de vórtices turbulentos, ou ainda por meio do balanço hídrico no solo e equações como a de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Existem vários métodos de estimativa da ETo que podem ser divididos de acordo com os princípios envolvidos em cinco categorias: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões. Alguns dos métodos são adaptados a determinadas condições locais onde foram desenvolvidos, tendo o seu uso limitado em maior escala. Outros, em função do seu embasamento técnico-científico, como é o caso do método de Penman-Monteith, são adotados universalmente (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

Diferentes métodos foram desenvolvidos para estimar espacialmente a evapotranspiração real (ET_r) utilizando dados de geoprocessamento, podendo ser citados: métodos residuais do balanço de energia, que combinam algumas relações empíricas com modelos físicos e que utilizam dados de geoprocessamento para estimar parâmetros de entrada dos modelos, como o método de Teixeira (2010), posteriormente batizado como SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) em Teixeira, Hernandez e Lopes (2012) e aplicado neste trabalho.

Enfim, este recurso permite obter resultados satisfatórios sobre análises em diversas áreas da ciência, em escala regional, sobretudo no ramo da agricultura. Neste contexto, a evapotranspiração torna-se um elemento de maior importância, pois sendo um dos principais componentes do ciclo hidrológico a sua estimativa com maior confiabilidade, possibilitará melhor entendimento sobre o balanço de água, e consequentemente melhor planejamento da irrigação, principalmente em áreas com limitados recursos hídricos. A evapotranspiração pode ser expressa em valores totais, médios ou diários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, no período considerado (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

Assim sendo, a estimativa de evapotranspiração através de imagem de satélite também tem suas limitações, bastando para isso observar a grande área

tomada para a obtenção deste parâmetro. Uma das vantagens da determinação da evapotranspiração por meio de imagens de satélite é a obtenção deste valor tomado *pixel a pixel*, ou seja, os valores de evapotranspiração poderão ser extrapolados para uma área maior ou até uma região, diferentemente do que ocorre com dados locais.

A situação atual das culturas comerciais revela que a água vem sendo usada produtivamente, proporcionando desenvolvimento socioeconômico à região, porém a falta de controle da água aplicada e erosão excessiva proveniente da agricultura mal manejada podem adversamente afetar a disponibilidade e qualidade da água, podendo em algumas microbacias inviabilizar a expansão da agricultura irrigada. Com a perda da qualidade em conjunto com a possível escassez provocada por alterações climáticas, todos os usuários (urbanos, industriais, agricultores e ecológicos) estarão competindo pelo suficiente abastecimento de água fresca. Assim, estudos em caráter regional são necessários para subsidiarem ações no presente, que garantam o suprimento hídrico no futuro.

Durante o ciclo vegetativo da cultura (Figura 2), o valor do coeficiente de cultura (K_c) varia à medida que a planta cresce e desenvolve, do mesmo modo que a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação varia à medida que as plantas crescem e atingem a maturação. Uma vez que a evapotranspiração de referência representa um índice climático da demanda evaporativa, o K_c varia, essencialmente, de acordo com as características da cultura, traduzindo, em menor escala, a variação dos elementos climáticos (FREVERT; HILL; BRAATEN, 1983).

Este fato possibilita a transferência de valores de K_c de um local para outro e de um clima para outro. O coeficiente de cultura pode variar de acordo com a textura e o teor de umidade do solo, com a profundidade e densidade radicular e com as características fenológicas da planta. Entretanto, o conceito de K_c tem sido usado, extensivamente, para estimar a necessidade real de água de uma cultura particular por meio de estimativas ou medições de ETo (SEDIYAMA; RIBEIRO; LEAL, 1998).

Idealmente, a ET_r deveria caracterizar a demanda evaporativa determinada pela condição meteorológica, enquanto o K_c seria a medida da restrição imposta pelo sistema solo-planta para atender tal demanda hídrica. Todavia, várias pesquisas têm demonstrado que a evapotranspiração da cultura não pode ser,

simplesmente, estabelecida para todas as situações climáticas com um simples valor de K_c . Os coeficientes de culturas devem ser, portanto, determinados para cada estágio de desenvolvimento da cultura.

Devido ao crescente uso de computadores nas diversas aplicações agrícolas, há interesse em representar, matematicamente, a curva de K_c das culturas de interesse econômico a fim de computar o consumo de água desses cultivos.

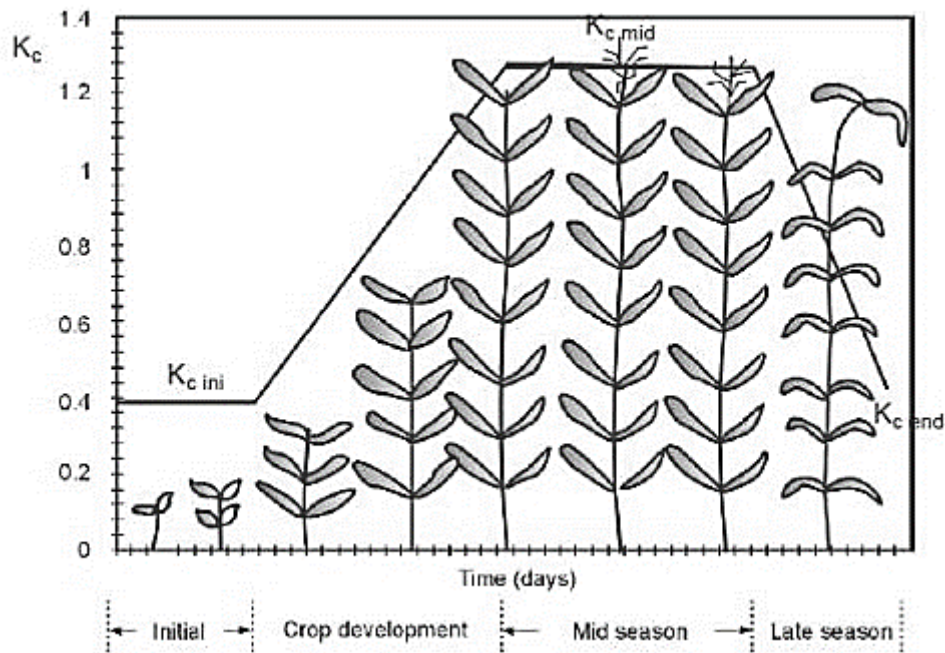


Figura 2. Curva Generalizada de K_c para a soja, segundo a FAO, 1998.

2.5. O algoritmo SAFER e suas aplicações

Os elementos climáticos exercem grande influência sobre o crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas. Por meio dos modelos agrometeorológicos, é possível interpretar o efeito da variabilidade climática sobre a produção vegetal. Do mesmo modo, Fonseca, Formaggio e Ponzoni (2005) afirmam que os modelos agrometeorológicos visam representar de forma simplificada as relações existentes entre a resposta fisiológica das plantas e as variáveis ambientais durante os diferentes estádios fenológicos de uma cultura.

Esses modelos requerem um conhecimento detalhado sobre as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, as quais são transferidas para

sistemas de equações que quantificam as contribuições das variáveis agrometeorológicas na expressão da produtividade final das culturas agrícolas. Nesses modelos, a decisão sobre quais variáveis utilizar está baseada em relações empíricas obtidas através do conhecimento experimental e também consideram os processos fisiológicos da vegetação.

King (1989) ressalta que os modelos agrometeorológicos não só explicam o fenômeno estudado, mas também permitem extrapolações para condições ambientais diferentes daquelas vigentes sobre os dados utilizados para a geração dos modelos. Berlato (1987) propôs um modelo de estimativa da produtividade da soja no Rio Grande do Sul na qual é utilizada a razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração de referência, sendo atribuídos pesos diferentes para diferentes estádios de desenvolvimento da cultura de acordo com a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico, obtendo ótimo ajuste do modelo agrometeorológico para a região.

Considerando o custo de instalação de complexos equipamentos de medição e a escassez de recursos humanos e econômicos, novas metodologias foram desenvolvidas para rápida obtenção de dados hidrológicos, como o uso do sensoriamento remoto. Com o objetivo de simplificar o processo de obtenção de variáveis hidrológicas para grandes áreas, alguns algoritmos têm sido desenvolvidos nos últimos anos, dentre os quais se destaca o SAFER (TEIXEIRA;HERNANDEZ; LOPES, 2012).

No SAFER, a determinação da E_{Tr} foi desenvolvida e validada envolvendo tanto as culturas irrigadas, como as de vegetação natural, tentando assim, aproximar melhor da evapotranspiração real (TEIXEIRA;HERNANDEZ; LOPES, 2012).

O algoritmo estima a evapotranspiração por meio de parâmetros biofísicos obtidos pelo uso de sensoriamento remoto associado aos dados diários de estações agrometeorológicas e tem vantagem de não utilizar informações de classificação das culturas, nem de condições extremas de seca e nem conhecimento específico de física de radiação, podendo ser feitas análises de tendências históricas (TEIXEIRA, 2012), é baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração real em larga escala. No SAFER a relação entre a evapotranspiração real e a de referência (E_{Tr}/E_{To}) é modelada e não há a necessidade de se identificar os

extremos representados pelos pixel frio e pixel quente e a implementação é baseada em Teixeira (2010), porém utilizando o coeficiente “a” no valor de 1,0 conforme os trabalhos de Hernandez et al. (2012) e Teixeira et al. (2014).

O SAFER foi validado com dados de quatro experimentos do campo envolvendo irrigação, culturas e vegetação natural em condições semi-áridas brasileiras, empiricamente calibrado para o Noroeste do estado de São Paulo e ajustado para outras regiões. Além disso, tem vantagem de não serem necessárias faixas térmicas e têm a possibilidade de aplicação com dados agrometeorológicos possibilitando a avaliação das tendências históricas e dos componentes de produtividades (TEIXEIRA, 2012).

Os valores de coeficiente de cultura obtidos pelo SAFER para tomate industrial comparados com a FAO por Sales et al. (2017), observaram que há bom ajuste para os resultados das variáveis analisadas, evidenciando assim uma forte relação entre os métodos analisados, o modelo SAFER mostrou-se consistente na avaliação do consumo de água do tomateiro, demonstrando ser um algoritmo recomendado para a estimativa da evapotranspiração real da cultura.

Em um estudo realizado na bacia hidrográfica do Alto Tocantins - GO, Andrade et al. (2014) utilizaram o algoritmo SAFER para determinar a evapotranspiração real em áreas de pastagem com diferentes classes de degradação e encontraram valores médios de $1,50 \pm 0,67$ mm dia⁻¹ para pastagens com pouca degradação e sem degradação. Nesse caso, os autores justificam que o manejo das pastagens (por exemplo, o superpastejo) e a heterogeneidade espaçotemporal da precipitação anual podem ter influenciado os resultados obtidos.

Segundo Franco, Hernandez e Teixeira (2015) os valores médios das estimativas dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração em diferentes tipos de uso e ocupação do solo com aplicação do algoritmo SAFER e uso de imagens Landsat 5 - TM mostraram que o algoritmo possibilitou a identificação da variabilidade espacial da evapotranspiração em condições de sazonalidade climática, demonstrando a sua suscetibilidade a diferentes tipos de uso e ocupação do solo e tornando-se assim, uma ferramenta no monitoramento dos recursos hídricos.

Américo et al. (2015) avaliaram em áreas verdes urbanizadas a aplicação do algoritmo SAFER. O estudo possibilitou consolidar informações a respeito da interação positiva entre área verde e área urbana com auxílio de sistemas automatizados de irrigação nas áreas de lazer dentro de condomínios, melhorando o conforto térmico e visual, mostrou adequado para estudos urbanos, permitindo a identificação e a quantificação das principais variáveis para a evapotranspiração real.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e caracterização do solo e clima

A área de estudo está localizada no nordeste do estado de São Paulo, em Jaboticabal, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (Figura 3), com as seguintes coordenadas: 21°15'1.31" S, 48°16'32.40" O e altitude de 613 m.

Segundo Thornthwaite (1948), o clima é do tipo B1rB'4a', clima úmido com pequena deficiência anual, mesotérmico, evapotranspiração no verão responde a 48% a mais do que a evapotranspiração média anual (CAPORUSSO; ROLIM, 2015).

Os dados meteorológicos de radiação solar global incidente (RS), temperatura do ar (Ta) e evapotranspiração de referência (ET_o), calculados pelo método de Penman-Monteith através do software SMAI (Sistema para Manejo da Agricultura Irrigada – desenvolvido pela Área de hidráulica e irrigação – UNESP Câmpus Ilha Solteira), foram obtidos na Estação Agroclimatológica do Departamento de Ciências Exatas da UNESP-Câmpus de Jaboticabal, cujas coordenadas geográficas são: 21°14'14" S, 48°46'25" O e altitude de 613 m.

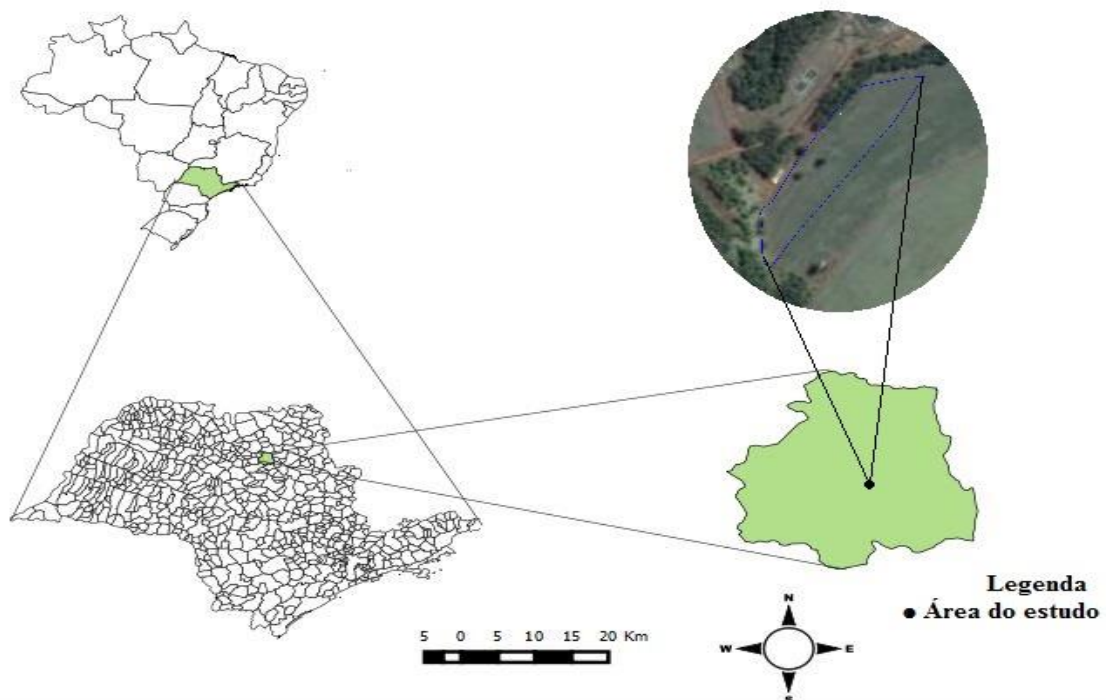


Figura 3. Mapa de localização da área de estudo em Jaboticabal – SP.

3.2. Aquisição das imagens

Durante o desenvolvimento da soja, foram utilizadas sete imagens do Landsat-8 OLI(órbita 220, ponto 75), pois se registram imagens a cada dezesseis dias, correspondendo (Tabela 2) as datas de solo exposto, estágio vegetativo, reprodutivo e colheita. As imagens foram obtidas a partir do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e algumas foram descartadas devido à presença de nuvens. A passagem do Landsat 8 na área de estudo ocorreu próximo às 13h10min (GMT-3:00) dos dias estudados, no ano agrícola 2016/2017, de outubro a março.

Tabela 2. Datas das imagens do Landsat 8, Dia Juliano (DOY), Fase da cultura (FC), Tempo local (TL - h), Ângulo de elevação do Sol (ES - °), Distância Sol-Terra(ST), Azimuth Sol (AZ - °), Temperatura do ar (Ta-°C), Umidade relativa (Ur-%), Pressão atmosférica (Pa-kPa), no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal-SP.

Data	DOY	FC	TL	ES	ST	AZ	Ta	Ur	Pa
18/10	292	Solo exposto	13:10:28	62,14	0,996	69,40	26,4	72	98,2
19/11	324	V2	13:10:28	65,18	0,988	90,39	25,6	71,3	98,1
05/12	340	V6	13:10:27	64,24	0,985	97,29	25,1	70,7	98,7
06/01	06	R3	13:10:20	60,72	0,983	97,74	25,8	70,7	98,3
07/02	38	R6	13:10:07	57,45	0,986	84,46	24,9	76	98,9
23/02	54	R8	13:10:02	55,70	0,989	74,97	24,6	70,2	98,4
11/03	70	Colheita	13:09:54	53,49	0,993	64,99	26,3	69,5	98,2

3.3. Evapotranspiração real com o uso do método tradicional eSAFER

Após o acompanhamento da cultura da soja durante 135 dias, foi feita a obtenção das imagens no acervo do INPE e o processamento pelo software *Ilwis*(Integrated Land and Water Information System), e assim, a construção dos polígonos para cada variável. Foi aplicado o método tradicional de estimativa da

evapotranspiração da cultura pelo método da FAO 56 (ALLEN et al. ,1998) através da expressão 1:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (1)$$

em que, ET_c - evapotranspiração da cultura, $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$; ET_o - evapotranspiração de referência, $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$; K_c - coeficiente de cultura (adimensional).

A evapotranspiração de referência representa o consumo potencial de uma cultura de referência (grama batatais) sem restrição de água e nutrientes, selecionada para propósitos comparativos sob dadas condições meteorológicas (THORNTWAITE; HOLMAN, 1944), com adequados tratos e obtida na Estação Agroclimatológica do Departamento de Ciências Exatas da UNESP- Câmpus de Jaboticabal. A evapotranspiração da cultura (ET_c) obtida neste caso representará a potencial, ou o máximo consumo de água, a partir dos coeficientes de cultura determinados experimentalmente e foi comparado com os obtidos na modelagem baseada em sensoriamento remoto.

O SAFER é um modelo que requer parâmetros físicos obtidos por sensoriamento remoto, juntamente com dados de estações meteorológicas (Figura 4). Para a modelagem dos componentes de energia e obtenção da evapotranspiração foram aplicados os procedimentos metodológicos que possibilitaram a obtenção dos seguintes parâmetros: reflectância monocromática de cada banda, albedo planetário, saldo de radiação, fluxo de calor latente e sensível, fluxo de calor no solo, temperatura de brilho das bandas 10 e 11, radiação solar global incidente, radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre, radiação de onda longa emitida pela atmosfera, NDVI (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada), albedo de superfície e temperatura da superfície.

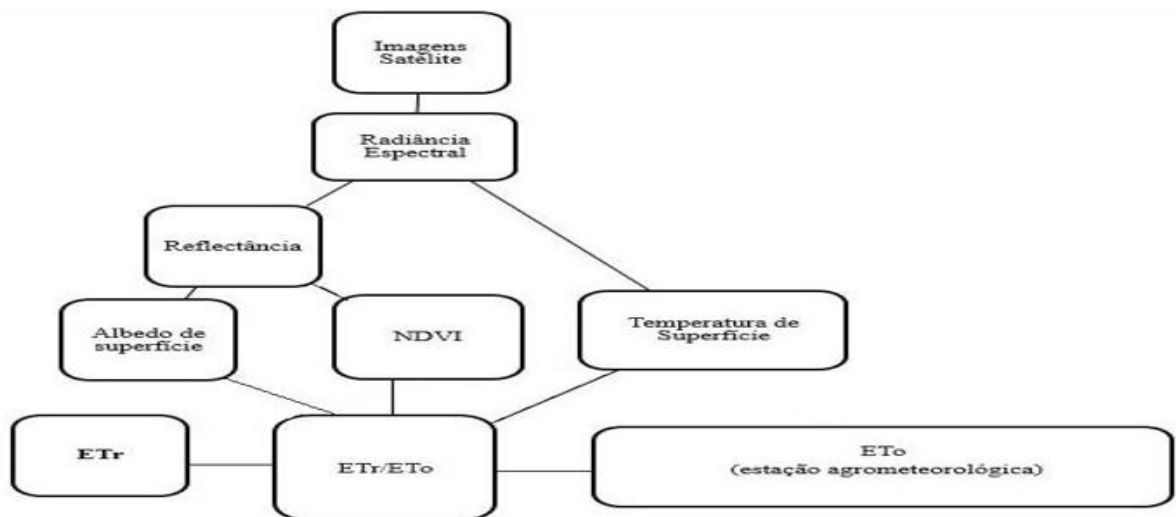


Figura 4. Fluxograma das etapas do SAFER utilizando temperatura de superfície, albedo de superfície e NDVI.

3.4. Processamento

Antes da obtenção da estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto às imagens foram processadas, com correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas para o cálculo do balanço de energia. Para o geoprocessamento das informações foi utilizado o software *Ilwis* que na função *script* possibilitou os cálculos dos dados no formato matricial (*raster*).

3.4.1. Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância

Inicialmente correções atmosféricas foram realizadas e posteriormente a conversão dos valores digitais em radiância espectral (CHANDER; MARKHAM, 2003) para cada banda (Equação 2), sendo que a Radiância (L_λ) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica ($W \cdot m^{-2}$):

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) * Q_{cal} + L_{MIN} \quad (2)$$

em que, L_{max} - radiância máxima, $W \cdot m^{-2}$; L_{min} - radiância mínima, $W \cdot m^{-2}$; Q_{cal} - intensidade do pixel (ND), número inteiro variando de 0 a 255.

3.4.2. Cálculo de reflectância

Para cada banda é calculada então a reflectância (p_λ) a partir dos valores de radiância obtidos na etapa anterior, sendo a reflectância o processo pelo qual a radiação escorrega num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d'água, ou um solo exposto (Equação 3).

$$p_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda}{ESUN_\lambda * \cos Z * E_0} \quad (3)$$

em que, L_λ - radiância de cada banda; $ESUN_\lambda$ -irradiância espectral no topo da atmosfera (Tabela 3); Z - ângulo zenital; E_0 - ângulo diário; em que, E_0 é definido por:

$$E_0 = 1,000110 + 0,0342221 \cos x + 0,001280 \sin x + 0,000719 \cos (2x) + 0,000077 \sin (2x) \quad (4)$$

Sendo x definido pela equação 5:

$$x = (d_n - 1) * \frac{2\pi}{365} \quad (5)$$

Sendo, d_n - dia juliano da imagem.

Tabela 3. Descrição das bandas do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
1 (azul)	0,43 – 0,45	1718,8
2 (verde)	0,45 - 0,51	1810,4
3 (vermelho)	0,53 - 0,59	1741,7
4 (IV-próximo)	0,64 - 0,67	1558,3
5 (IV-médio)	0,85 – 0,88	962,5
6 (IV-termal)	1,57 – 1,65	206,3
7 (IV-médio)	2,11 - 2,29	68,8

Fonte: modificado de Teixeira et al.(2017)

3.4.3. Albedo no topo da atmosfera

A obtenção do albedo planetário foi feita pela equação 6:

$$\alpha_{top} = \sum (\omega_{\lambda} * p_{\lambda}) \quad (6)$$

em que, p_{λ} - reflectância (nm); ω_{λ} - coeficiente para cada banda, calculado na Tabela 4 e obtido pela equação 7:

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad (7)$$

Tabela 4. Coeficientes (ω_{λ}) para o cálculo do albedo planetário para cada banda do Landsat 8.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
Landsat 8	0,1	0,31	0,30	0,13	0,08	0,05	0,04

(Fonte: TEIXEIRA et al., 2017).

3.4.4. Albedo de superfície

As informações sobre o albedo de superfície foram obtidas pela equação do albedo do topo da atmosfera utilizando os coeficientes de Teixeira et al. (2017):

$$\alpha_o = 0,6054 * \alpha_{top} + 0,0797 \quad (8)$$

Em que, α_{top} -albedo no topo da atmosfera, obtido na equação 6.

3.4.5. Temperatura de superfície

Segundo Teixeira et al. (2013), os fundamentos do sensoriamento remoto termal estão embasados na termodinâmica clássica e na física quântica. O problema de se estimar a temperatura de um corpo por meio de sensores remotos é solucionado utilizando as Leis de Kirchhoff e a Lei de Planck.

A base fundamental do sensoriamento remoto do infravermelho termal é que toda superfície emite radiação, e sua intensidade depende da temperatura da superfície estudada.

Para estimar a temperatura da superfície pelo SAFER, utilizou-se a imagem do Landsat da banda do infravermelho termal do sensor OLI do satélite Landsat - 8, com resolução espacial de 30 metros.

A temperatura de superfície foi calculada pela equação 9:

$$T_0 = 1,0693 \cdot T_{\text{bright}} - 20,173 \quad (9)$$

T_{bright} é obtido pela equação 10:

$$T_{\text{bright}} = \frac{\frac{1321,08}{\ln\left(\frac{774,89}{L_{10}+1}\right)} + \frac{1201,14}{\ln\left(\frac{480,89}{L_{11}+1}\right)}}{2} \quad (10)$$

sendo, L_{10} e L_{11} as radiâncias (L_λ) das bandas 10 e 11, respectivamente.

3.4.6. Saldo de radiação

A radiação global incidente ($R_{g\downarrow}$) foi obtida no piranômetro na estação agrometeorológica, enquanto a radiação de onda longa refletida pela superfície ($R_{r\uparrow}$) foi calculada pela equação 11:

$$R_{r\uparrow} = R_{g\downarrow} \cdot \text{Alb}_{24} \quad (11)$$

em que $R_{g\downarrow}$ - radiação de onda curta incidente em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e Alb_{24} - albedo diário

A radiação de onda longa incidente ($R_{l\downarrow}$) foi calculada pela equação de Stefan-Boltzman, utilizando-se os valores de temperatura da estação meteorológica.

$$R_{l\downarrow} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (12)$$

em que, σ - constante de Stefan-Boltz ($5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); ε - o poder de emissividade do corpo e T - é temperatura obtida por meio da estação agrometeorológica em Kelvin.

Enquanto que a radiação de ondas longas emitidas pela superfície da Terra ($R_{l\downarrow}$) foi obtida pela lei de Stefan-Boltzman, o valor de $R_{l\uparrow}$ foi encontrado por meio da

diferença entre radiações de ondas curtas, a radiação de onda longa emitida pela atmosfera e o saldo de radiação (R_n).

$$R_{I\uparrow} = (R_{g\downarrow} - R_{r\uparrow}) + (R_{I\downarrow} - R_n) \quad (13)$$

Os valores de R_n foram obtidos pela equação 14 :

$$R_n = (1 - \alpha_o) R_{g\downarrow} - a \tau_{sw} \quad (14)$$

em que $R_{g\downarrow}$ em $W \cdot m^{-2}$; a é um coeficiente de regressão entre o saldo de radiação de ondas longas e transmissividade atmosférica de ondas curtas (τ_{sw}), sendo obtido utilizando a equação 15:

$$a = b T_a - c \quad (15)$$

Sendo que “ b ” e “ c ” são coeficientes de regressão obtidos por Teixeira et al. (2008) para as condições brasileiras, sendo 6,99 e 39,93, respectivamente. Os valores de T_a correspondem a interpolação dos dados de temperatura média do ar.

3.4.7. Índice de vegetação de diferença normalizada-NDVI

Em seguida foram calculados os dados de NDVI pela equação 16:

$$NDVI = \frac{(\rho_5 - \rho_4)}{(\rho_5 + \rho_4)} \quad (16)$$

Sendo, NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*; ρ_5 - reflectância da banda 5 - infravermelho médio; ρ_4 - reflectância da banda 4-infravermelho próximo

Posteriormente, os dados de albedo de superfície, temperatura de superfície e NDVI foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET_r/ET_o , empregando-se valor 1,0 para o coeficiente “ a ” (HERNANDEZ et al., 2014; TEIXEIRA et al., 2013) e o coeficiente “ b ” foi obtido por Teixeira (2010) correspondendo ao valor de -0,008, conforme equação 17:

$$\frac{ET_r}{ET_o} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_o}{\alpha_o NDVI} \right) \right] \quad (17)$$

Em seguida, os valores instantâneos dessa relação foram então multiplicados pelos valores diários da ETo, chegando assim na ETr:

$$ETr = \frac{ETr}{ETO} \cdot ETo \quad (18)$$

3.5. Avaliação dos resultados obtidos

Após o processamento das imagens, sendo obtidos os valores médios dos parâmetros biofísicos que compõem as variáveis analisadas para a área de estudo, estas foram importadas no software *Quantum Gis*®2.6 para a confecção dos mapas.

O desempenho das variáveis foi avaliado estatisticamente através da análise de regressão linear em que se consideraram os indicadores estatísticos, coeficiente de determinação, coeficiente de correlação simples de Pearson “r” e pelo índice de Willmontt “d”.

O coeficiente de determinação (R^2) varia entre 0 e 1, sendo igual a 1 o ajuste perfeito, se R^2 for igual a 0, a regressão não consegue explicar a variabilidade ocorrida nela.

O índice de concordância de Willmontt está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, variando de 0 para nenhuma concordância, a 1 para a concordância perfeita conforme equação 19:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (|X_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right] \quad (19)$$

Em que: d é o índice de Willmontt; X_i é o valor estimado; Y_i é o valor observado; $\bar{Y}$ é a média dos valores observados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais variáveis agrometeorológicas para estimar a evapotranspiração real: radiação global, precipitação e temperatura, são apresentadas na Figura 5 em uma escala do período de aquisição de imagem de outubro/2016 a março/2017, com dados da estação agrometeorológica da UNESP-FCAV/Jaboticabal.

A temperatura máxima do ar manteve-se sempre próxima da média climática da região com até 33,5 °C, e a temperatura mínima com 19,2 °C, conforme Figura 5. A precipitação acumulada durante o desenvolvimento da cultura foi de 830 mm e ETo acumulada de 553,5 mm. O ciclo da cultura foi de 26/10/2016 a 13/03/2017, com 56 dias sem chuva.

A cultivar BRS Valiosa, que foi a implantada no experimento teve uma produtividade de 3.577,3 Kg/ha, ou seja, 59,62 sc/ha. Sendo considerada boa para uma média do estado de São Paulo com 50 sc/ha.

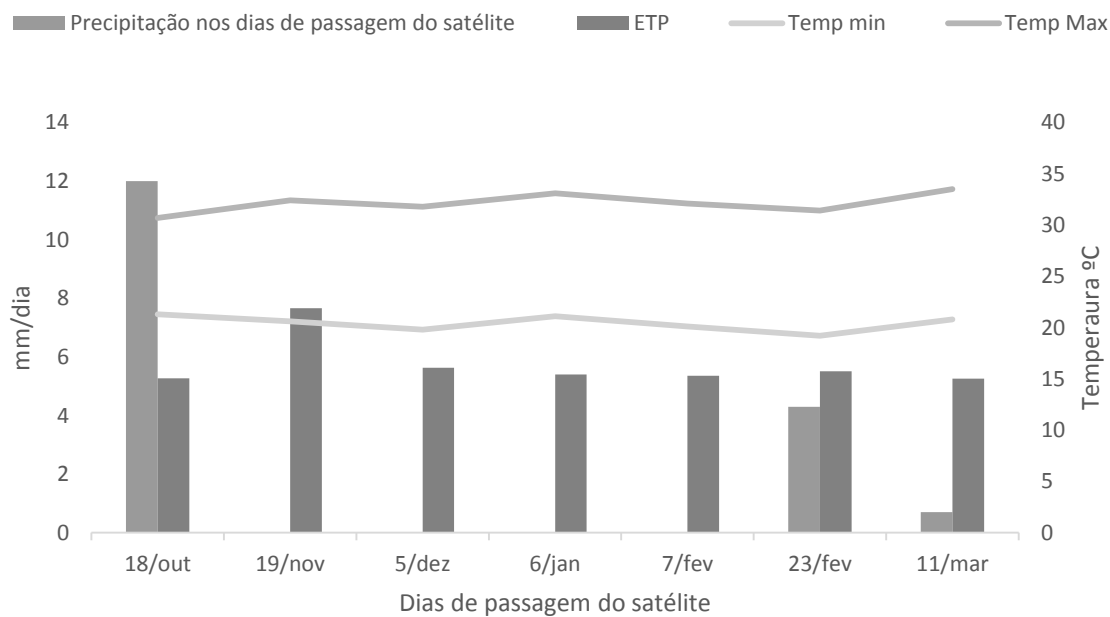


Figura 5. Dados agrometeorológicos coletados na estação no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal - SP.

4.1. Albedo de superfície

O albedo sofre ação direta das condições climáticas, se há precipitação o albedo muda. É também modificado pela densidade e rugosidade, ou seja, quanto mais úmido ou mais rugosa ou densa for a cultura, menor será o valor do albedo, e quanto menor o valor do albedo mais energia o ambiente estará absorvendo.

O resultado foi uma média de 18% de albedo de superfície para a cultura da soja em 135 dias na safra agrícola de 2016/2017 (Figura 6). Em condições de pleno desenvolvimento, André e Viswanadham (1983) encontraram para soja, valor médio de 24%. Embora os valores encontrados no presente trabalho sejam menores do que os dos autores este fato é atribuído ao horário em que houve a passagem do satélite, devido ao menor ângulo de incidência dos raios solares, causando maior penetração e retenção no interior da área estudada.

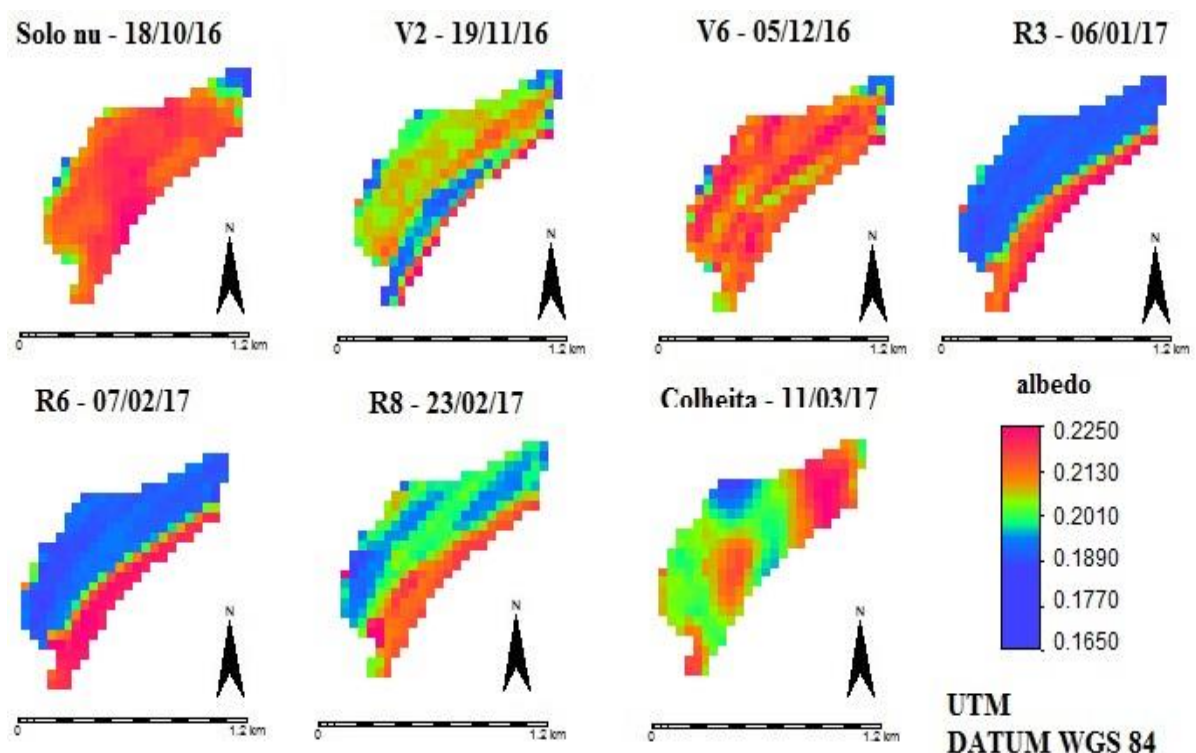


Figura 6. Distribuição espacial dos valores diários de albedo de superfície em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.

Notou-se ainda que os locais que possuíam baixa cobertura vegetal ou solo exposto, foram os que apresentaram os maiores valores de albedo, variando de 18% a 22%, o que pode ser explicado pelo fato de que refletem grande parte da radiação incidente e contribuem para o aumento do albedo de superfície nestes locais. Silva, Lopes e Azevedo (2005) encontraram albedo de 31% em solo exposto utilizando imagens TM-Landsat-5 do município de Petrolina/PE.

Na correlação entre o albedo e o NDVI, por serem índices de vegetação, a variação pôde ser ajustada a um modelo exponencial com R^2 de 0,77, com índice de Willmott (d) de 0,86 e coeficiente de correlação de Pearson “r” de 0,84 conforme (Figura 7).

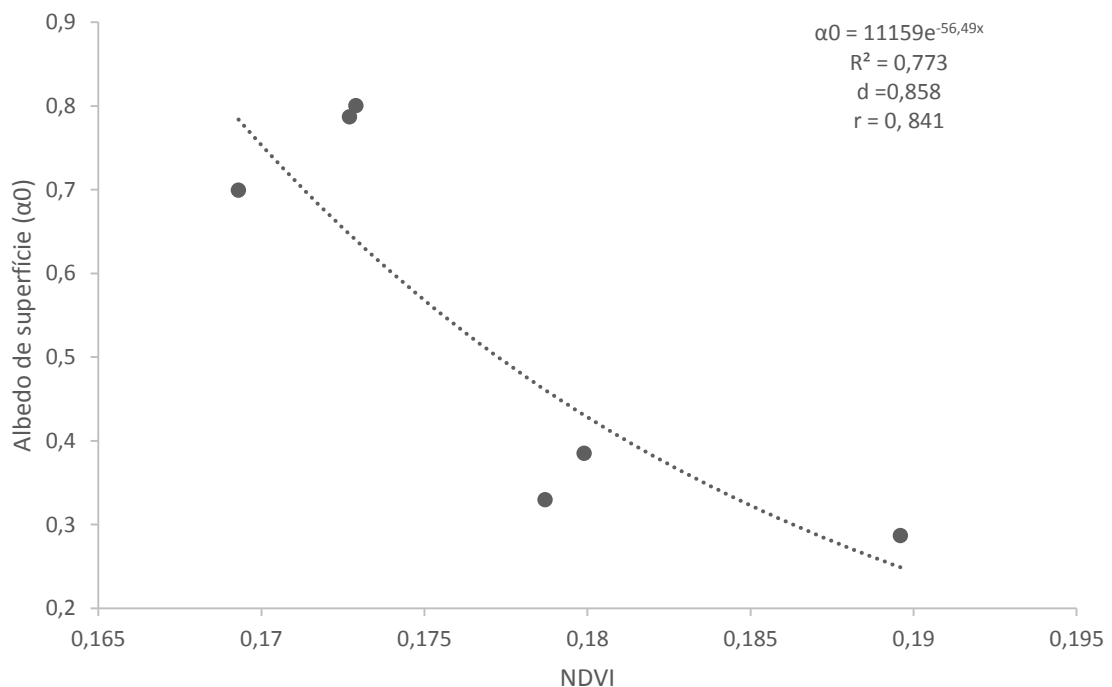


Figura 7. Albedo de superfície versus NDVI para a cultura da soja no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 para Jaboticabal - SP.

O albedo de superfície tem relação direta com o saldo de radiação, pois quanto menor o albedo maior será o R_n (Figura 8). Segundo Moura (1999), um

aumento do albedo resulta num decréscimo do R_n , por causa do aumento da radiação enviada de volta para o espaço.

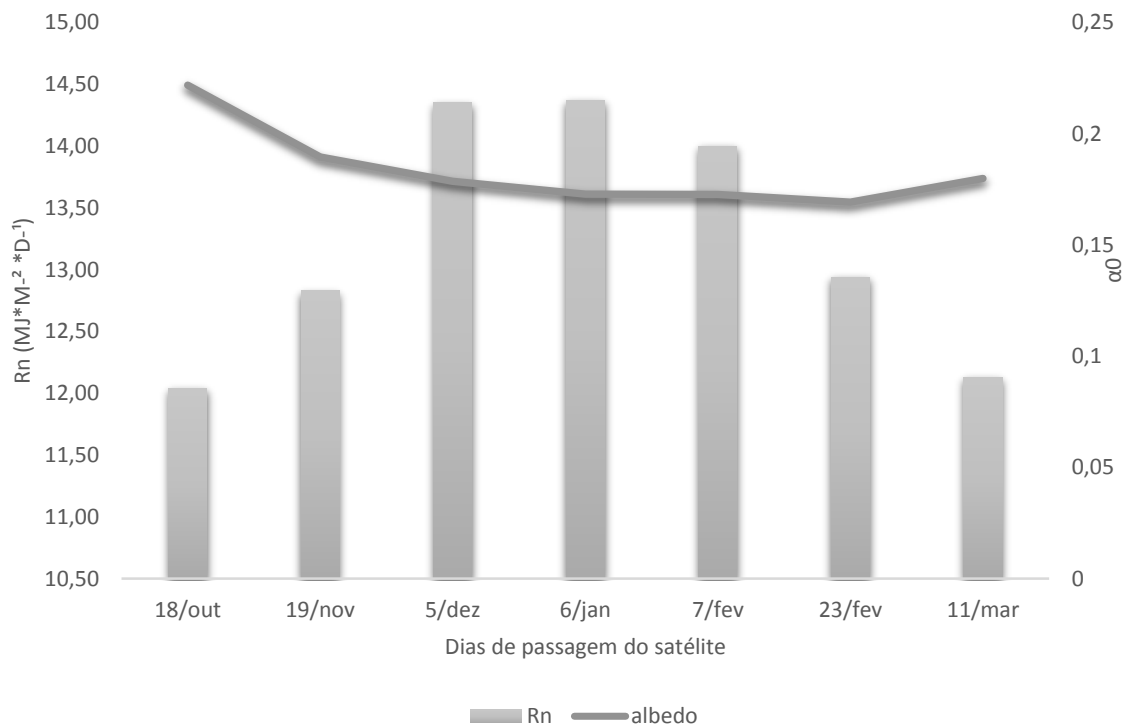


Figura 8. Comparação do albedo de superfície (α_0) com o saldo de radiação (R_n) no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 na cultura da soja em Jaboticabal – SP.

Em relação a variação de albedo por pixel de cada imagem, na Figura 9, pode ser observado por diversos fatores, com a variação da quantidade de cobertura em cada fase em que o satélite capturou. O albedo médio foi maior na imagem do dia 18/10/2016, com o solo exposto, na qual há maior presença de cor cinza em tons mais escuros, devido ainda a data ser a mais distante do verão e por isso, o ângulo de incidência da radiação é mais facilmente refletido em relação ao da radiação para as imagens referentes a janeiro e fevereiro.

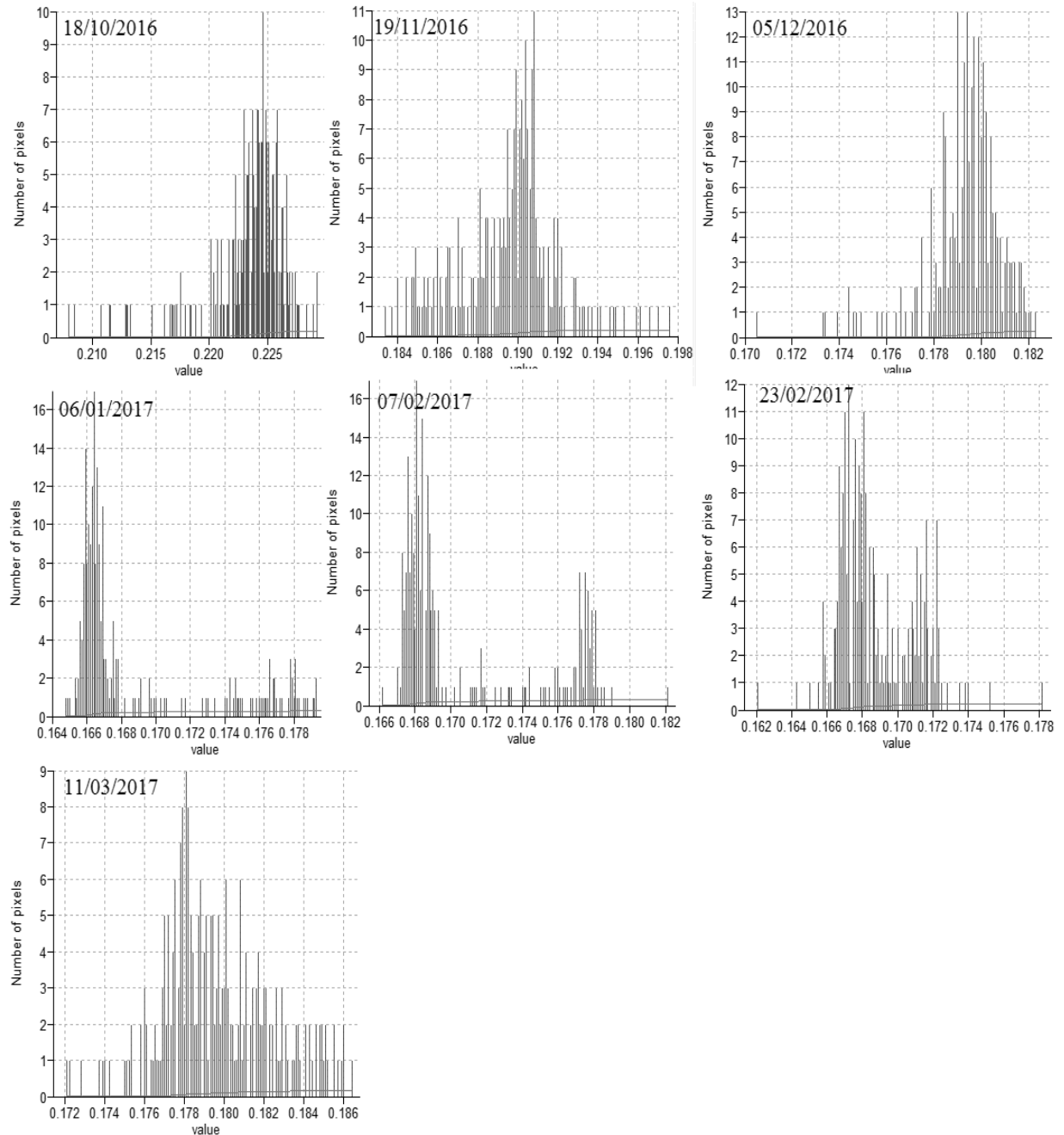


Figura 9. Histograma de distribuição de pixel para o albedo no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.

4.2. NDVI

As medidas de índice de vegetação como o NDVI têm, na maioria das vezes, ligação direta com o valor de biomassa, área foliar, cobertura do solo e rendimento

agrícola (ANTUNES; ASSAD; BATISTA, 1993). Neste sentido, estudos realizados por Grohs et al. (2009) e Povh et al. (2008) apontaram que a produtividade de grãos pode ser relacionada à reflectância espectral da vegetação, e esta pode ser quantificada por meio do NDVI (RAUN et al., 2005). Este é mais sensível a variação das condições hídricas, como ocorrência de chuva próxima à passagem do satélite, e das variações das fases da cultura do que o albedo.

O NDVI apresenta valores numéricos que variam entre -1 e 1, quanto mais próximo de 1, mais densa é a vegetação; e assim, abaixo de zero indica superfície não vegetada. Jensen (2009) apresenta que a importância desse índice concentra-se em dois aspectos: o monitoramento de mudanças sazonais e interanuais da atividade e do desenvolvimento da vegetação; e a redução de sombras de nuvens, variações topográficas e diferença de iluminação solar quando utilizado apenas as estações agrometeorológicas.

Os maiores valores de NDVI foram encontrados nas épocas de pleno desenvolvimento (R3 e R6) e variaram entre 0,78 e 0,80, bom indicativo de formação completa da cultura, sendo as fases em que tiveram maior acúmulo de biomassa e os menores valores foram encontrados com o solo exposto e com início da cultura (V2), ficando compreendidos na faixa de 0,27 e 0,28, exposto na Figura 10. Mercante et al. (2010) avaliando o NDVI na soja encontraram correlação média de 0,56 e o presente trabalho encontrou de 0,54. Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2015) em estudos com o feijoeiro na região do Cerrado no Distrito Federal.

Segundo Silva et al. (2009), existe boa correlação entre as medidas de reflectância e a produtividade, pois a produtividade está relacionada à quantidade de radiação interceptada pela cultura e a reflectância correlaciona com quantidade de tecido foliar fotossinteticamente ativo presente por unidade de área capaz de interceptar a radiação solar.

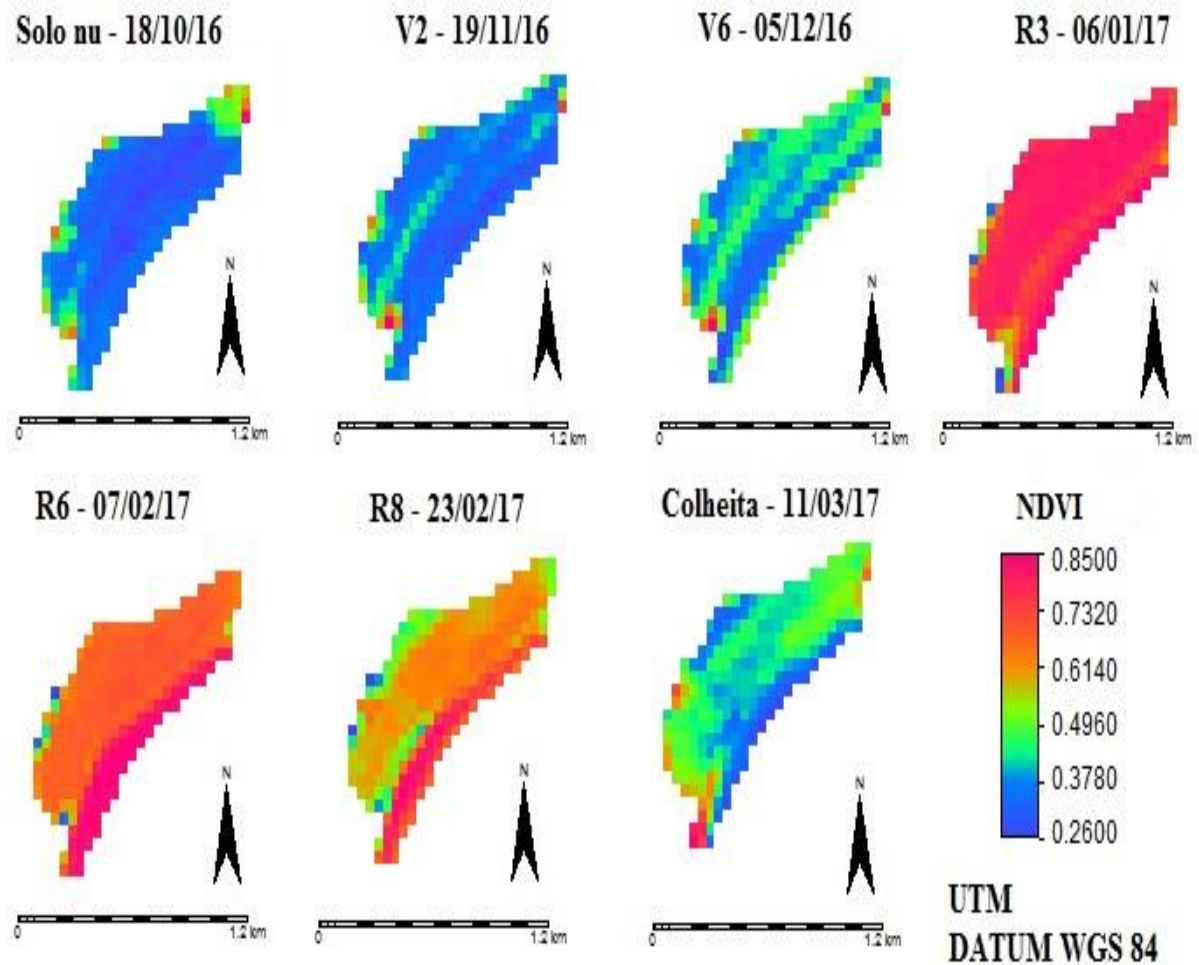


Figura 10. Distribuição espacial dos valores diários de NDVI em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.

Na Figura 11 estão os histogramas de frequência dos valores de NDVI para o período estudado, e pode-se perceber maior concentração da média entre os dias 06/01, 07/02 e 23/02, enquanto que há maior dispersão dos valores nas outras datas, devido principalmente à quantidade de precipitação durante esse período.

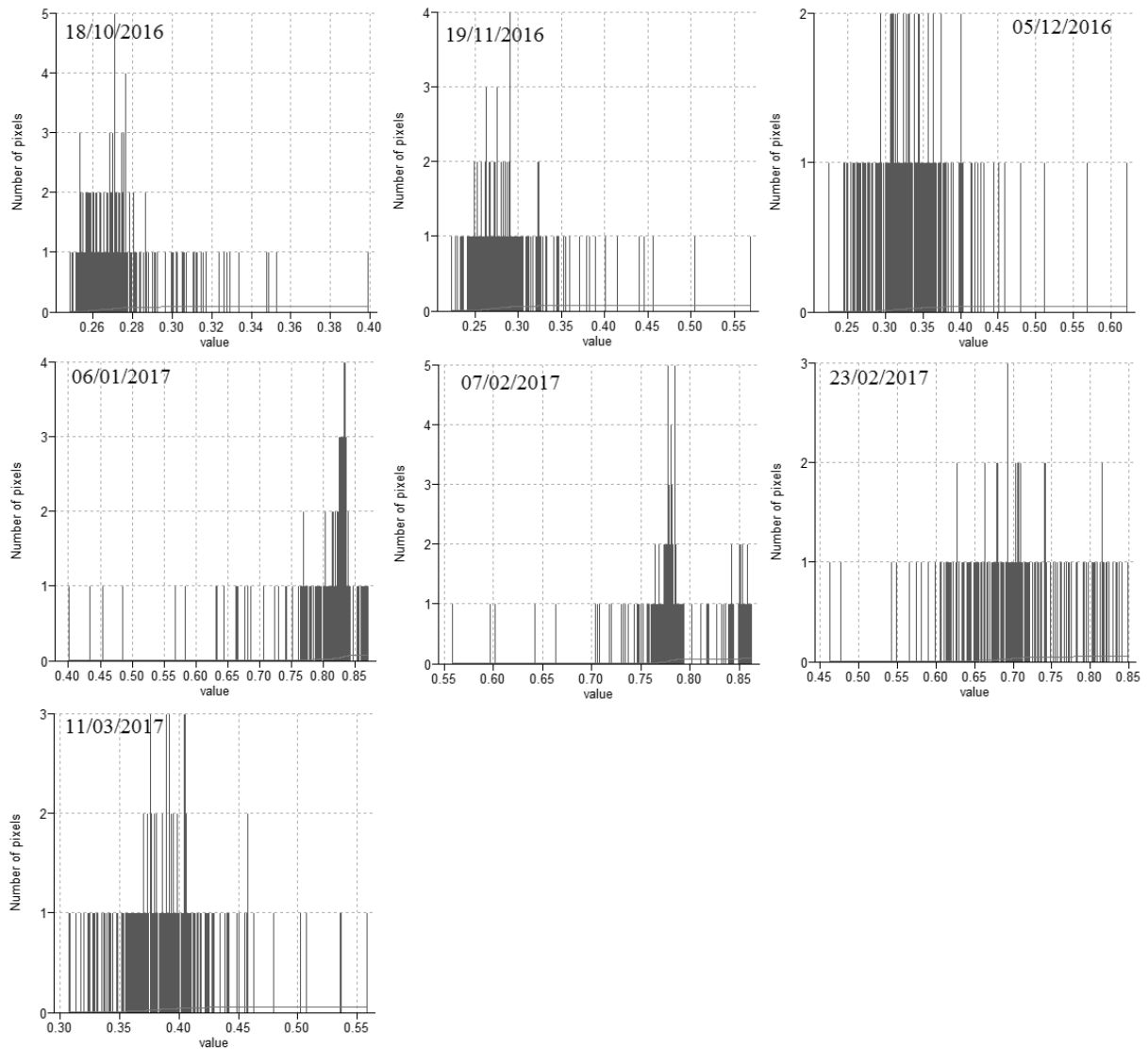


Figura 11. Histograma de distribuição de pixel para o NDVI no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.

4.3. Temperatura de superfície

Os resultados do SAFER registraram temperaturas mais amenas para todas as fases da cultura quando comparado aos medidos na estação, exceto na primeira imagem quando o solo ainda estava exposto, conforme Figura 12. A temperatura obtida através do SAFER oscilou em relação aos dados fornecidos pela estação agrometeorológica entre 0,05 °C e 1,5 °C, no período de pleno desenvolvimento da

cultura. No solo exposto ou na colheita, houve o efeito do albedo apresentando assim as maiores variações de temperatura, 2,11°C e 3,89 °C.

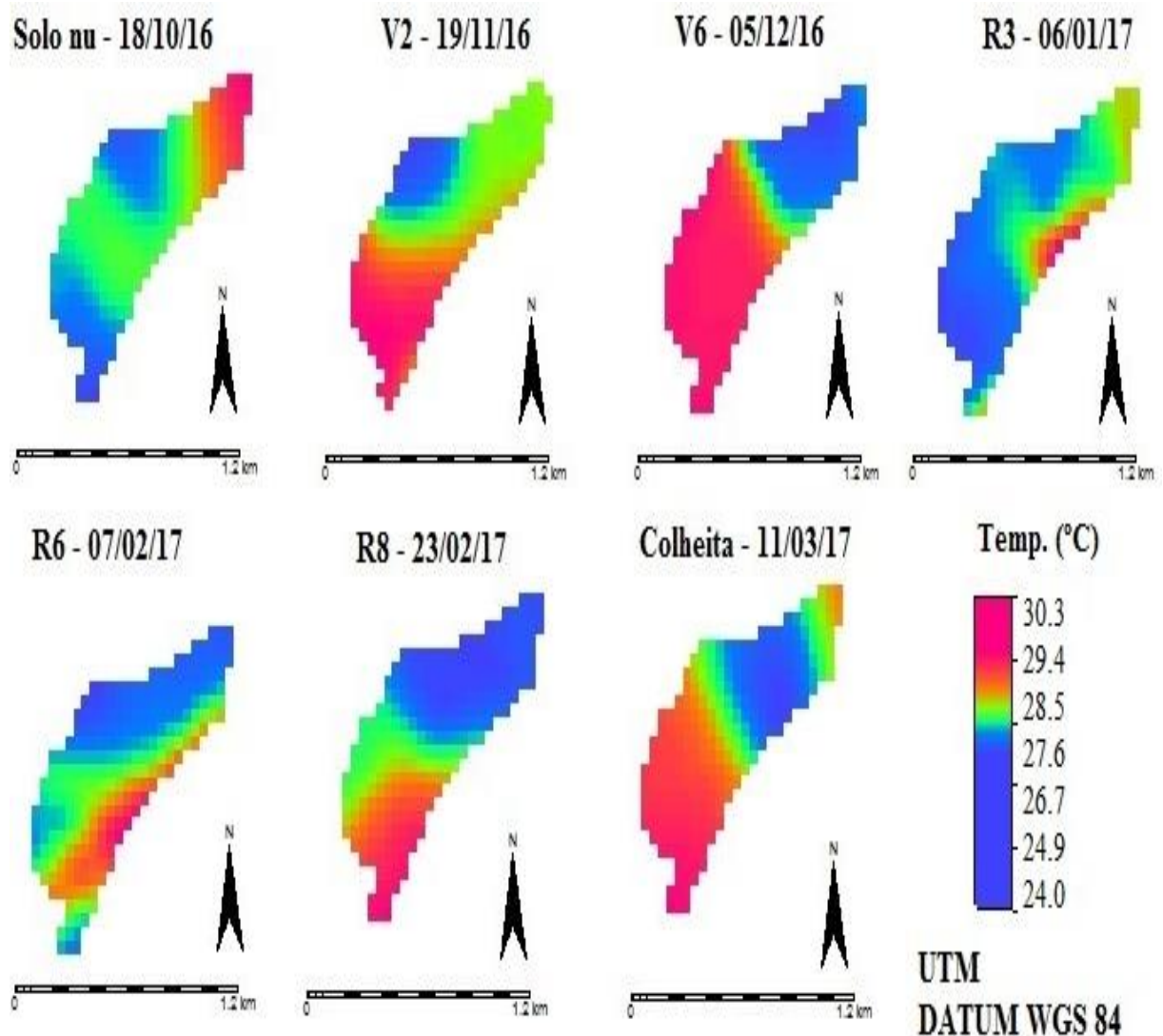


Figura 12. Distribuição espacial dos valores diários de temperatura de superfície em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.

Conforme Figura 13, a distribuição de pixel pelas imagens em cada data, mostra os maiores valores com o solo exposto ou na colheita, o que já era esperado devido ao efeito do albedo citado acima.

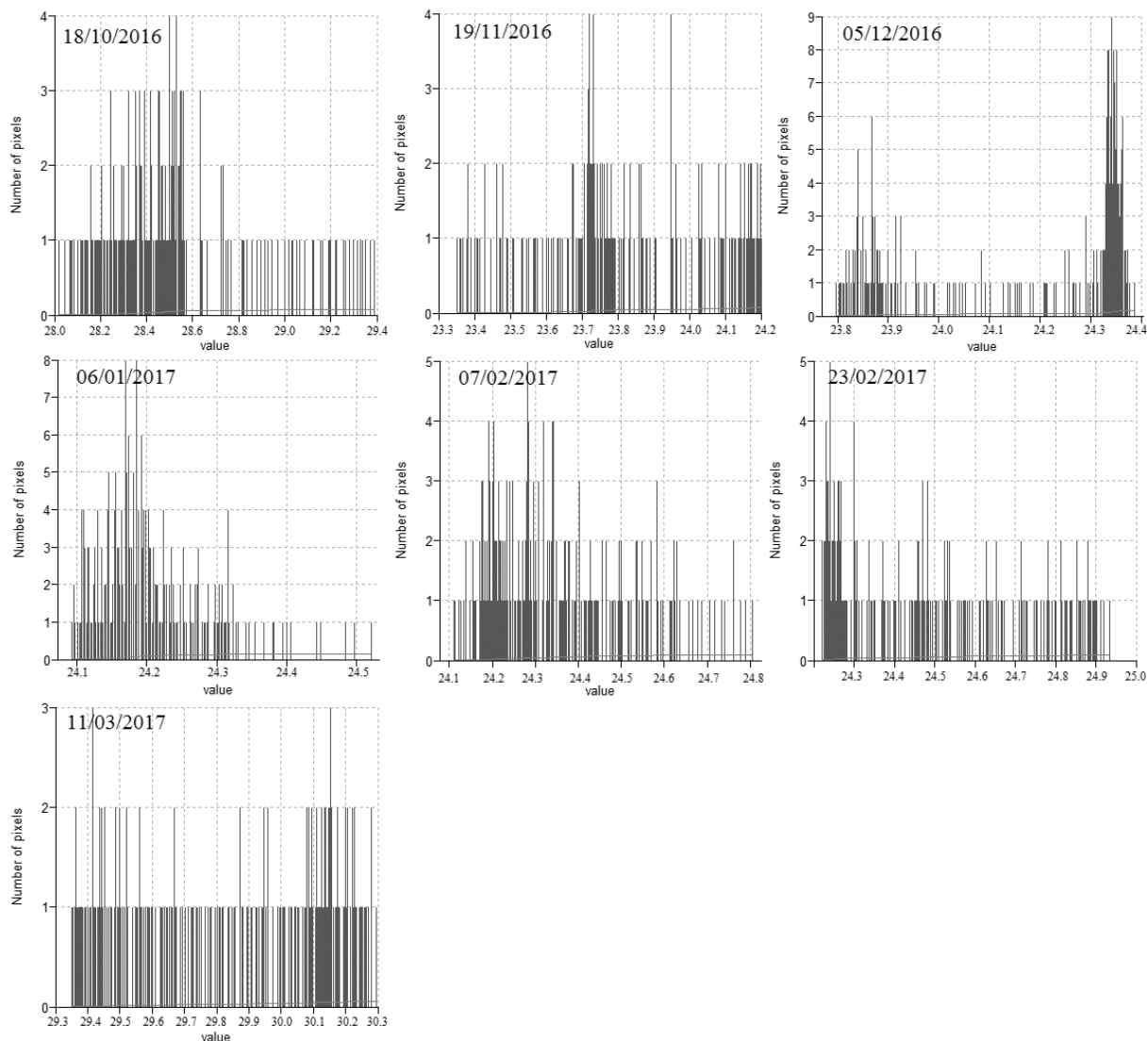


Figura 13. Histograma de distribuição de pixel para a temperatura de superfície no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.

Segundo Souza e Silva (2005), a variação sazonal da temperatura de superfície ocorre por dois motivos principais: o primeiro relacionado à radiação, de acordo com a época das imagens; e o segundo pela condição hídrica, ou seja, em locais onde existe maior volume hídrico, a temperatura de superfície tende a diminuir, devido a elevada capacidade térmica da água.

Constatou-se que a temperatura de superfície estimada pelo SAFER foi menor do que a do ar influenciada principalmente pela fase que a cultura encontra-se em campo, podendo assim o uso do valor estimado pelo algoritmo, ser mais específico que o encontrado nas estações agrometeorológicas.

Eram esperadas temperaturas maiores em algumas fases, principalmente no final da floração (R3), porém como ocorreram precipitações nos dias anteriores à passagem do satélite houve a influência nos resultados, pois a água agiu resfriando a superfície. Por isso, nas áreas com estágio vegetativo pleno podem ocorrer menores temperaturas, pois conseguem diminuir a temperatura do solo.

O SAFER apresentou valores de temperatura de superfície amenas, por considerar uma sequência de variáveis que ao cômputo final dos valores se aproximaram de valores precisos. Fato que torna este algoritmo mais indicado para trabalhos cujo objetivo requer níveis mais detalhados em relação à temperatura da superfície.

Na Tabela 5 estão os valores médios e desvio-padrão, a comparação entre os valores estimados pelo SAFER e medidos pela estação agrometeorológica. Quando analisado o erro relativo da comparação na Tabela 5, observa-se baixo erro dos dados estimados em relação aos medidos, variando de 0,02% a 1,08%, ou seja, os valores estimados pelo SAFER foram inferiores aos medidos pela estação. Tal estimativa pode ser considerada satisfatória por estar dentro do erro permitido (menor que 5%) na comparação, pois essa porcentagem no erro pode estar associada a algum tipo de manutenção ou calibração necessária nos sensores nos dias analisados.

A equação da regressão para a Temperatura de superfície estimada pelo SAFER e medida pela estação agrometeorológica (Figura 14) é apresentada como $T_a = 0,2136T_s + 20,037$. A equação apresenta sinal positivo, o coeficiente angular é apresentado com valor de 0,2136, coeficiente linear de 20,037 e regressão regular ($R^2 = 0,61$).

Tabela 5. Valores médios da temperatura na superfície terrestre (TS) estimada pelo SAFER, temperatura medida pela estação (Tar), fase da cultura (FC), dia juliano da imagem (DOY), erro absoluto (Ea) e erro relativo (Er) em diferentes datas de passagem do satsatélite na cultura da soja no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.

Data	DOY	FC	Tar (°C)	TS (°C)	Ea	Er (%)
18/10/2016	292	Solo nu	26,4	28,51±1,7	-2,11	-0,7
19/11/2016	324	V2	25,6	24,12±2,5	1,48	0,50
05/12/2016	340	V6	25,1	24,30±1,0	0,8	0,27
06/01/2017	06	R3	25,8	25,75±0,5	0,05	0,02
07/02/2017	38	R6	24,9	24,25±0,9	0,65	0,22
23/02/2017	54	R8	24,6	24,30±2,2	0,3	0,1
11/03/2017	70	colheita	33,5	30,19±3,0	3,31	1,08

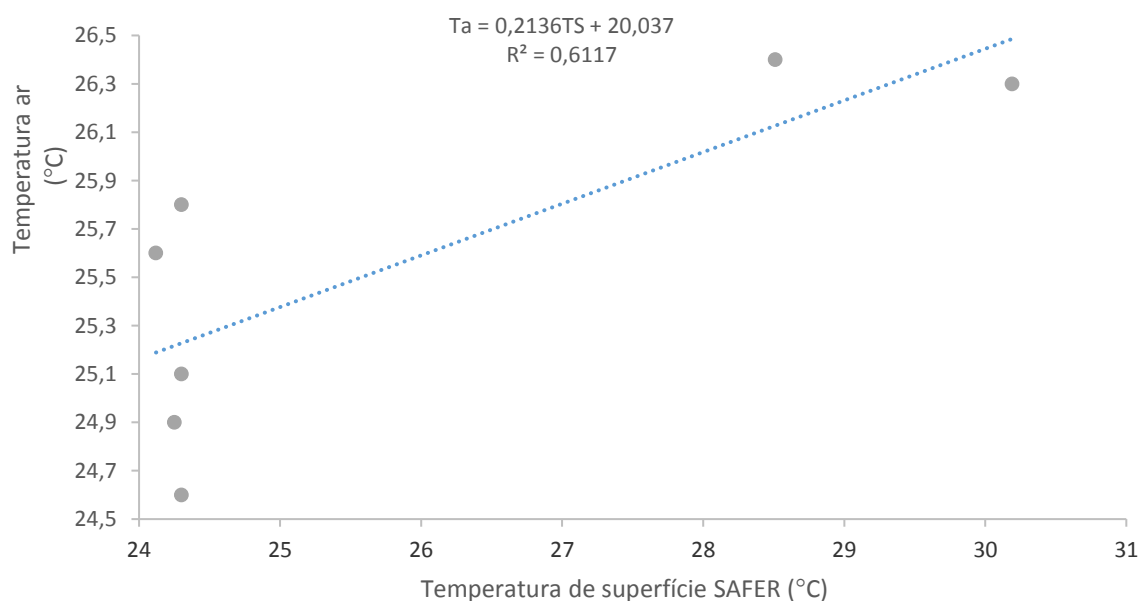


Figura 14. Regressão linear simples de temperatura de superfície do SAFER versus a temperatura medida pela estação agrometeorológica para a cultura da soja no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 para Jaboticabal - SP.

4.4. Saldo de radiação

Os valores médios do saldo de radiação obtidos sobre a área estudada com soja variaram de $10,20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ até $14,37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (Figura 15). Percebe-se que a variação do R_n tem uma relação direta tanto com o desenvolvimento da cultura, como com a declividade solar, uma vez que as datas das passagens do satélite abordam diferenças na incidência de radiação solar. A maior distribuição de pixel foi observado nas fases de maior desenvolvimento da planta, conforme Figura 16.

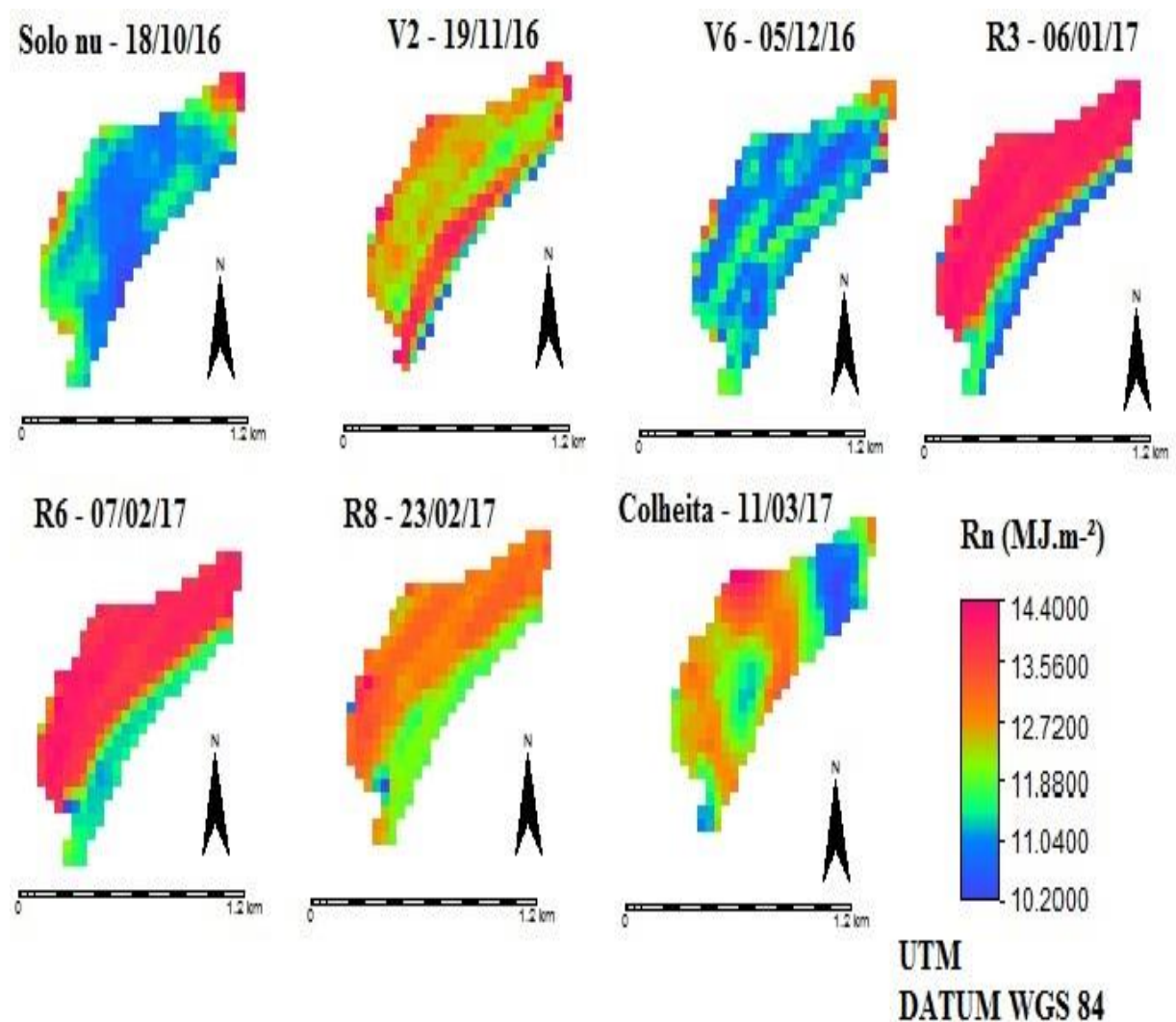


Figura 15. Distribuição espacial dos valores diários de Saldo de Radiação em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.

As fases onde o Rn foi menor são as que predominam os maiores valores da radiação de onda longa emitida, isto é, solo exposto e onde a vegetação é menos densa, observado na colheita (Tabela 6). Ainda que a temperatura de superfície afete na energia disponível, a qual interfere no saldo de radiação pelo balanço da radiação de ondas longas com valores maiores em áreas que estão mais secas e menores em locais úmidos.

Tabela 6. Valores médios do saldo de radiação(Rn SAFER) estimado pelo SAFER, saldo de radiação medido pela estação (Rn est.), fase da cultura (FC), dia juliano da imagem (DOY), erro absoluto (Ea) e erro relativo (Er) em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal-SP.

Data	DOY	FC	Rnest (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Rn SAFER (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Ea	Er (%)
18/10/2016	292	Solo nu	13,2	12,04±0,1	1,16	8,78
19/11/2016	324	V2	17,0	12,83±0,1	4,17	24,53
05/12/2016	340	V6	16,1	14,35±0,1	1,75	10,87
06/01/2017	06	R3	15,8	14,37±0,1	1,43	9,03
07/02/2017	38	R6	16,1	14,00±0,1	2,10	13,04
23/02/2017	54	R8	14,4	12,94±0,1	1,46	10,14
11/03/2017	70	colheita	14,0	12,13±0,1	1,87	13,36

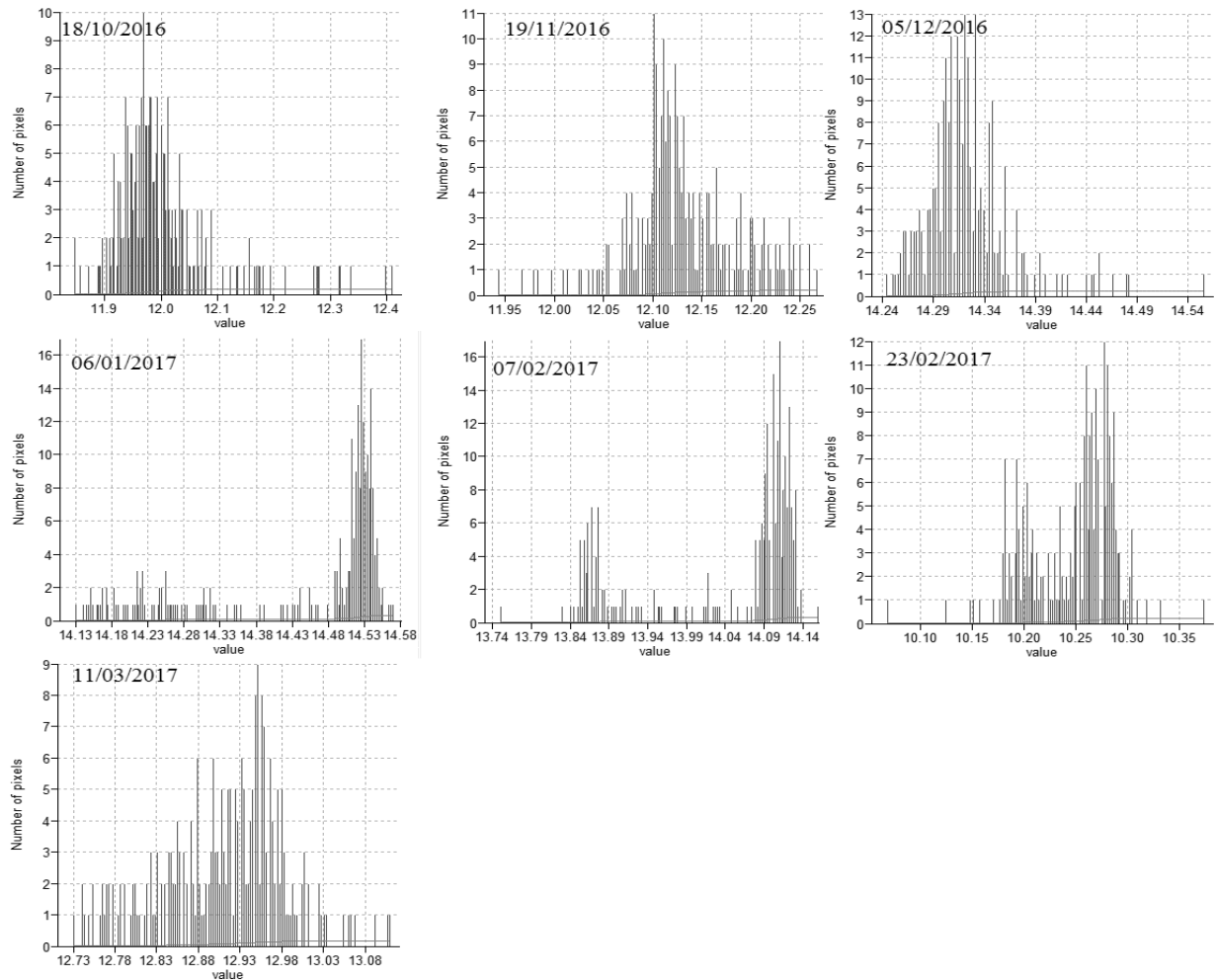


Figura 16. Histograma de distribuição de pixel para o saldo de radiação no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.

A variação da altura, estrutura e fisiologia da soja altera a rugosidade da superfície de diferentes modos. Como o balanço de ondas longas é afetado pela temperatura da superfície e pela presença de nuvem, verificam-se baixos valores para R_n em períodos com maiores quantidades de precipitação.

Segundo Daughtry et al. (1990), em sua comparação entre medições e estimativas de R_n com sensoriamento remoto, o erro relativo obtido foi inferior a 7%, porém não é o que acontece com os desta pesquisa, que variou de 8,8% a 24,5%. Estes valores subestimados do SAFER, comparado com os medidos na estação agrometeorológica, podem estar relacionados com interferências de culturas, como eucaliptos próximos a área estudada.

4.5. Evapotranspiração real

Os valores de evapotranspiração real para a soja sobre a área de estudo foram estimados usando as imagens do Mapeador Temático do satélite Landsat 8 (LANDSAT OLI-8). A Figura 17 representa os dias da passagem do satélite durante o desenvolvimento da cultura, no período de outubro/2016 a março/2017, a qual apresentou ETr média de $2,29 \text{ mm dia}^{-1}$. Em contrapartida, a evapotranspiração determinada na estação agrometeorológica para este mesmo período foi de $4,20 \text{ mm dia}^{-1}$, portanto entre os valores estimados via imagem e medidos em campo, a diferença foi de 54,5%, ou seja, no desenvolvimento da cultura houve $1,91 \text{ mm dia}^{-1}$ a menos quando calculado pelo SAFER (Tabela 7).

Deste modo, com o uso do SAFER é possível contribuir para a formação de análises futuras em larga escala e de um banco de dados que atenda a necessidade hídrica da soja e uso racional da água na área.

A maior evapotranspiração real (ETr) durante o desenvolvimento da cultura ocorreu na fase de enchimento de grãos (R6), com valor médio de $3,56 \pm 0,4 \text{ mm dia}^{-1}$ (Tabela 7). Suyker e Verma (2008) estimaram evapotranspiração real de $6,5 \text{ mm dia}^{-1}$ para este estágio fenológico, no leste do Nebraska, EUA. Souza et al. (2011) encontraram pico máximo de $4,1 \text{ mm dia}^{-1}$, na região amazônica.

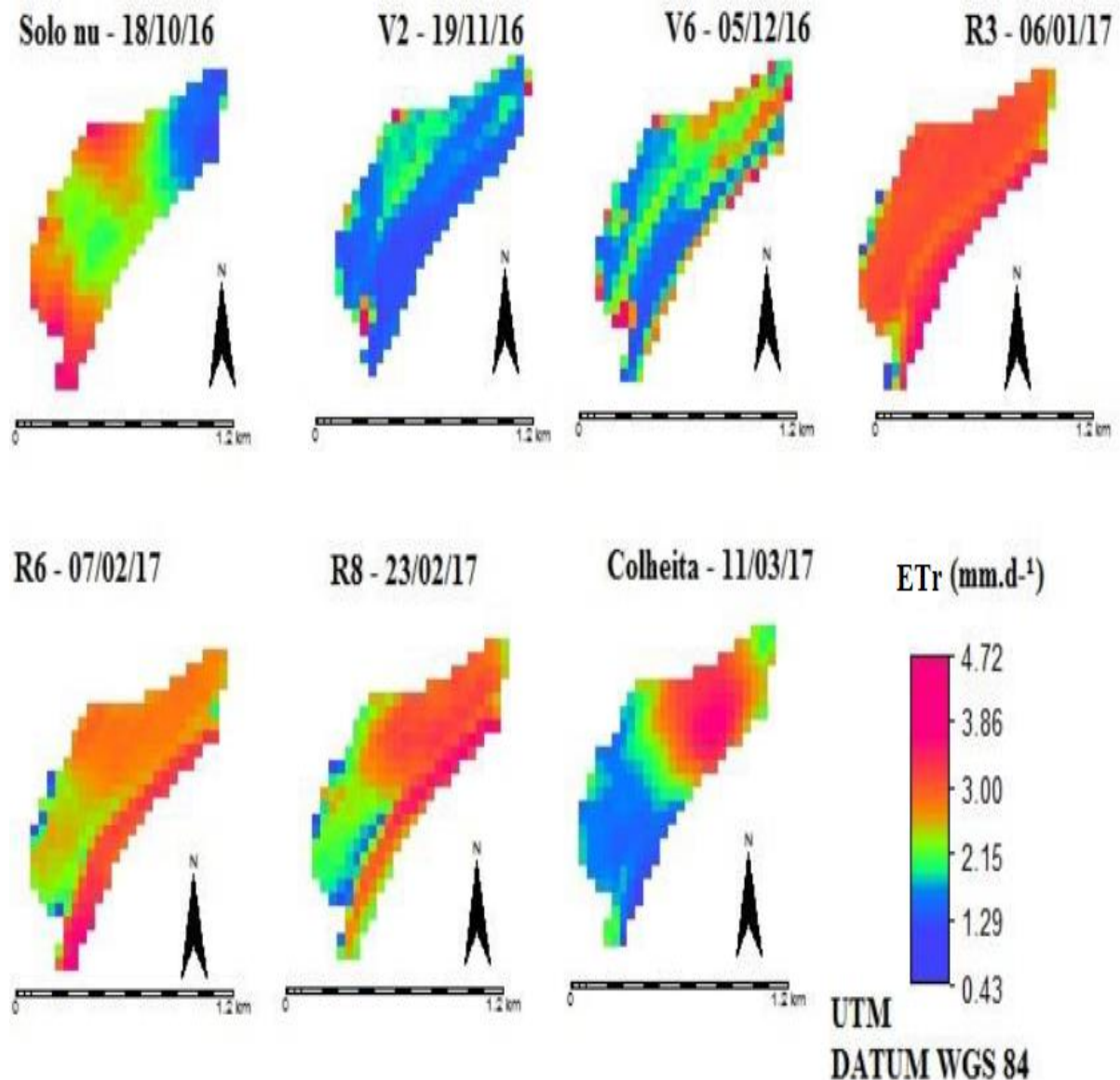


Figura 17. Distribuição espacial dos valores diários de Evapotranspiração real pelo SAFER em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal - SP.

As diferenças observadas entre os resultados encontrados com os dos autores citados ocorrem devido a evapotranspiração ser influenciada não apenas pela disponibilidade de água, demanda atmosférica e energia disponível, como também pelo índice de área foliar (SAKURATANI, 1987). Na fase R8 houve diminuição da ETr atingindo valores próximos de 1,7 mm dia⁻¹. Suyker e Verma (2008) também observaram essa diminuição, quando encontraram valores de evapotranspiração na

soja da ordem de 1 a 2 mm dia⁻¹ resultado da senescência da cultura no final do ciclo de cultivo. Sauer et al. (2007) também identificaram o mesmo declínio durante o período de senescência do dossel, com evapotranspiração da ordem de 1,1 mm dia⁻¹.

Tabela 7. Valores médios da evapotranspiração real (ET_r), evapotranspiração da cultura (ET_c), fase da cultura (FC), dia juliano da imagem (DOY) e coeficiente de cultura estimado pela FAO 56 (K_c), em diferentes datas de passagem do satélite na cultura da soja, no período de 26/10/2016 a 11/03/2017 no município de Jaboticabal-SP.

Data	DOY	FC	ET _c (mm·dia ⁻¹)	K _c (FAO)	ET _r (mm·dia ⁻¹)
19/11/2016	324	V2	2,68	0,35	0,43±0,3
05/12/2016	340	V6	4,27	0,75	1,48±0,3
06/01/2017	06	R3	5,85	1,1	2,92±0,6
07/02/2017	38	R6	5,97	1,1	3,56±0,4
23/02/2017	54	R8	4,13	0,75	1,68±0,4
11/03/2017	70	colheita	2,28	0,45	3,68±1,4
MÉDIA	-	-	4,20	-	2,29

As regressões entre os de ET_r e ET_c não apresentaram diferença significativa entre as relações lineares obtida (Figura 18). A equação neste sítio foi representada por $ET_c = 1,3723ET_r + 1,4252$, onde o coeficiente angular foi apresentado por valor igual a 1,3723 e o coeficiente linear igual a 1,4252. É observado que há uma boa regressão com um coeficiente de determinação quase perfeito, sendo $R^2 = 0,97$. Em relação a correlação de Pearson “r” teve um valor equivalente de $r = 0,84$; o índice de Willmontt “d” apresentou um valor de 0,99, sendo muito próximo de 1.

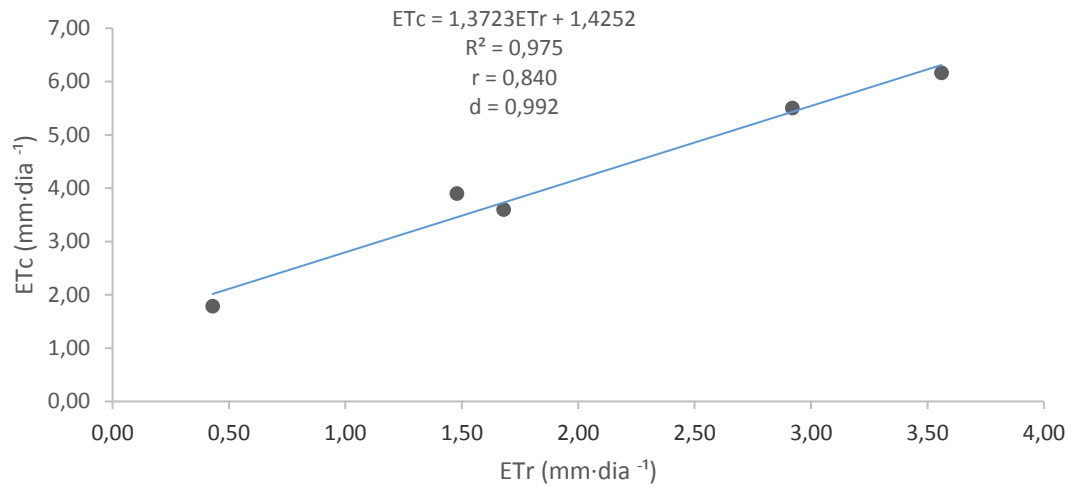


Figura 18. Regressão de evapotranspiração real versus evapotranspiração da cultura para a soja no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 para Jaboticabal - SP.

Na Figura 19, estão representados os histogramas de frequência da evapotranspiração real de todos os pixels da área estudada. Conforme se observa, a maior concentração está no dia 07/02 e a maior dispersão no dia 19/11.

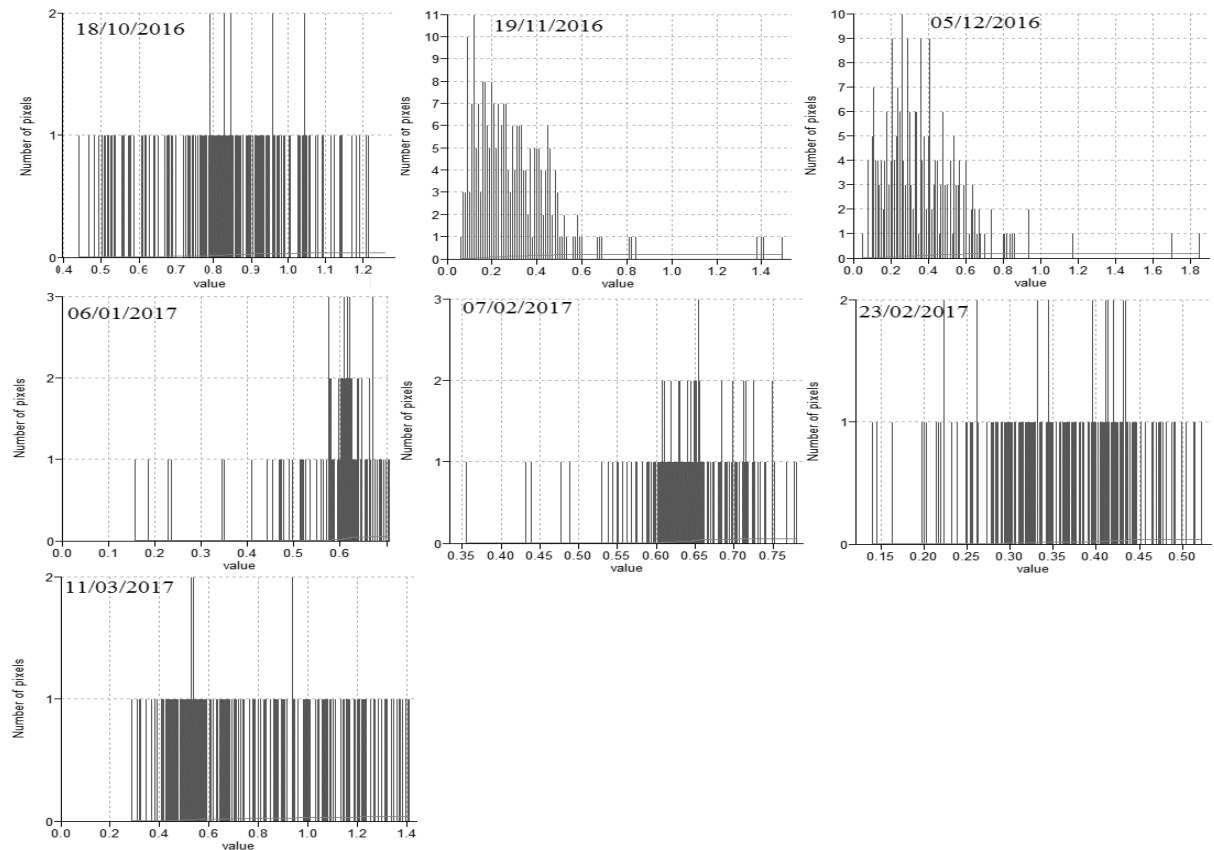


Figura 19. Histograma de distribuição de pixel para a evapotranspiração real no período de 18/10/2016 a 11/03/2017 em Jaboticabal-SP.

Na Figura 20, tem-se a interação da ETr com as variáveis avaliadas no presente trabalho, a ETr em função da temperatura de superfície e do NDVI foi a que teve maior R^2 , com 0,6931, podendo ser explicada por serem um indicador que fornece informações sobre a condição da vegetação e o teor de umidade superficial do solo, colaborando assim para uma melhor interação com a evapotranspiração real. No caso da interação entre ETr em função de NDVI e albedo, foi o que teve menor correlação, com um R^2 de 0,5931, pode ser explicado pelo NDVI ser mais preciso do que o albedo, afetando assim a correlação com as variáveis.

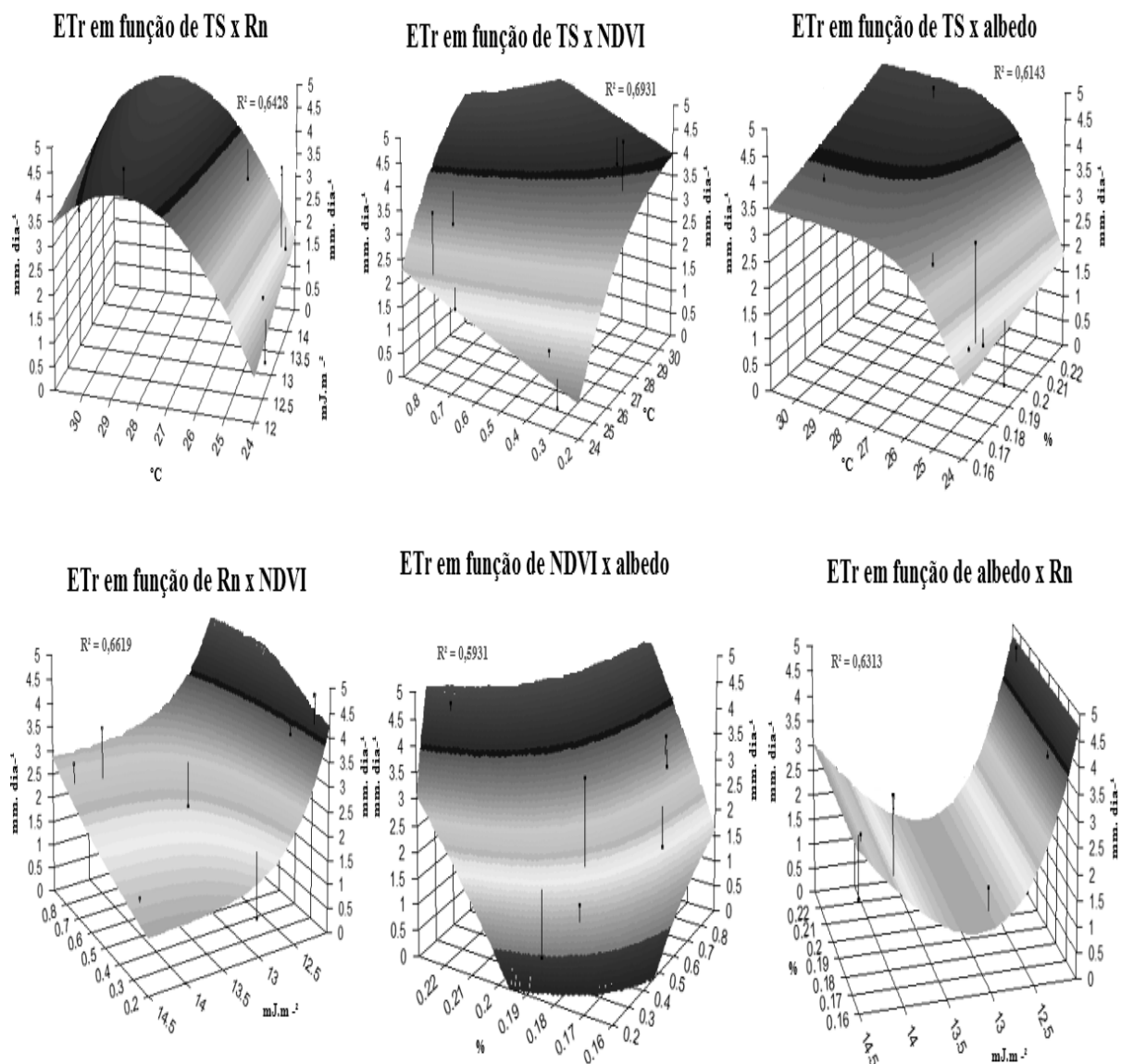


Figura 20. Interação da ETr em função das variáveis TS (temperatura de superfície), NDVI, albedo e Rn (Saldo de radiação) para a cultura da soja em Jaboticabal -SP.

5. CONCLUSÕES

O algoritmo SAFER aplicado no Landsat 8 estimou com alto nível de confiança as variáveis evapotranspiração real, temperatura da superfície, saldo de radiação, NDVI e albedo, como produto final no balanço de energia em larga escala, obtendo-se resultados apropriados para a cultura da soja.

O valor médio do albedo de superfície calculado pelo SAFER para todo o ciclo da soja foi de 18%. Os resultados indicam correlação do albedo interagido com o R_n para as datas avaliadas, sendo necessárias mais safras para corrigir e padronizar a umidade do solo na área para melhor análise.

Através do NDVI podem ser gerados mapas que auxiliarão de forma qualitativa na identificação de áreas com alta e baixa produtividade de soja. As áreas com valores próximos a 0,8 espera-se ter maiores produtividades.

O saldo de radiação determinado por meio das imagens do satélite Landsat 8 foi de $13,24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, estando subestimado quando comparado com o medido pela estação agrometeorológica.

A temperatura de superfície estimada pelo SAFER fica com valores próximos aos medidos pela estação agrometeorológica, com menos de 2% de diferença.

A E_{Tr} média estimada pelo SAFER apresenta redução de $1,91 \text{ mm dia}^{-1}$ comparada com o FAO 56.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, p.297, 1998.
- AMÉRICO, I. B.; HERNANDEZ, F. B. T.; COAGUILA, D. N.; TEIXEIRA, A. H. C. Uso do algoritmo SAFER para análise de conforto térmico e evapotranspiração em áreas urbanas. III INOVAGRI International Meeting, Fortaleza, **Anais....INOVAGRI**, p. 157-165, 2015.
- ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. DE C.; SANO, E. E.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; NOGUEIRA, S. F. Evapotranspiração em pastagens com indicativos de degradação na bacia hidrográfica do Alto Tocantins. In INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2014.
- ANDRÉ, R.G.B.; VISWANADHAM, Y. Radiation balance of soybeans grown in Brazil. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.30, p. 157-173, 1983.
- ANTUNES, M.A.H.; ASSAD, E.D.; BATISTA, G.T. Variação das medidas espectrais ao longo do ciclo da soja (Glicine Max (L.) Merrill.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, p.1-9, 1993.
- ARAUJO, G.K.D. **Determinação e mapeamento de início do ciclo para culturas de verão no estado do Paraná por meio de imagens de satélite e dados de precipitação**. 2010. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual Paulista – UNICAMP, Campinas.
- AWAD, M.; CASTRO, P.R.C. **Introdução à fisiologia vegetal**. 2. ed. São Paulo: Nobel, p.177, 1992.
- BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos, 1987. 93 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto de pesquisas Espaciais – INPE. São José do Campos.
- BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Consumo de água da soja: I. Evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo. In. SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1978. Londrina. **Anais...** Londrina: EMBRAPA/CNPSo, p. 53-58, 1979.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 625 p., 2006.

CÂMARA, G.M.S. Fenologia da soja. **Informações Agronômicas**, n.82, p.1-6, 1998.

CAMARGO, M.B.P. **Exigências Bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no estado de São Paulo**. 1984. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz” – Esalq, Piracicaba.

CAMARGO, M.B.P. Relações entre produtividade e exigências climáticas. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v.3, p. 67-69. 2006.

CAPORUSSO, N.B.; ROLIM, G.D.S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 37, n. 1, p.1-9, 2015.

CASAGRANDE, E. C.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; OYA, T.; PEDROSO, J.; MARTINS, P.K.; BRETON, M.C.; NEPOMUCENO, A.L. Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v.13, n.2, p. 168-184, 2001.

CAVALETT, O. **Análise do Ciclo de Vida da Soja**. 2008. 245f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, Piscataway, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra 2016/2017**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2> Acesso em: 10 nov. 2017.

CONFALONE, A.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.6, n.2, p.165-169, 1998.

CONFALONE, A.; DUJMOVICH, M.N. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.7, n.2, p.183-187, 1999.

CONFALONE, A.; NAVARO, M.D. Influência do “déficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**. Pelotas, v.5, n.3, p.195-198, 1999.

CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H. **Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas**. In. BERGAMASCHI, H.(Coord.) Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.85-97, 1992.

DAUGHTRY, C.S.T.; KUSTAS, W.P.; MORAN, M.S.; PINTER, P.J. JR.; JACKSON, R.D.; BROWN, P.W.; NICHOLS, W.D.; GAY, L. W. Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. **Remote Sensing of Environment**. Amsterdam, v.32, p. 111-124, 1990.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T. ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**. Madison, v.40,n.3,p.716-722,2000.

DE SOUZA, P.I.; EGLI, D.B.; BRUENING, W.P. Water stress during seed filling and leaf senescence in soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, n.5, p.807-812, 1997.

DINGMAN, S.L. **Physical hydrology**. Long Grove: Prentice Hall, 600p.,2002.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, FAO. Estudos: Irrigação e Drenagem, 306p., 1994.

EMBRAPA. **Exigências climáticas**. Tecnologias de produção de soja – Paraná. Londrina: Embrapa Soja, cap. 1, p.28-30, 2002.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Soja**. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil –Londrina: Embrapa, 261p., 2008.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2º Ed. Rio de Janeiro, RJ, 412p.,2009.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja: Região Central do Brasil**. Sistemas de Produção, Londrina: Embrapa Soja, n. 15, 2011.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil** – Londrina: Embrapa Soja, n. 16, p. 265, 2013.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, cap.15, p.261-278,2009.

FIETZ, C.R.; URCHEI, M.A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados,MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.6, n.2, p.262-265.2002

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo que está por trás do que se vê**. 2. ed. Passo Fundo: UFP, p. 536,2004.

FONSECA, E. L.; FORMAGGIO, A.R.; PONZONI, F.J. Parametrização de modelo agrometeorológico - espectral para estimativa da produção de pastagens do bioma Campos Sulinos (RS). In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, **Anais....** São José dos Campos: INPE, p. 127-134,2005.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER na determinação da evapotranspiração em condições de sazonalidade climática no noroeste paulista. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, **Anais....** São José dos Campos, INPE, p. 3189–3196, 2015.

FREVERT, D.R.; HILL, R.W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. ASCE, vol.109, p.265-270, 1983.

GAVA, R. **Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (Glycine Max, (L.) Merrill.)**. 2014.123f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz” – Esalq, Piracicaba.

GROHS, D.S.; BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M.; POLETO, N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.101-112, 2009.

HERNANDEZ, F.B.T. **Manejo da irrigação**. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/irrigacao.html>. 2002. Acesso: 20 jan. 2017.

HERNANDEZ, F.B.T.; TEIXEIRA, A.H.C; NEALE, C.M.U.; TAGHVAEIAN, S. Determining actual evapotranspiration on the large scale using agrometeorological and remote sensing data in the Northwest of the São Paulo State, Brazil. In: International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, Geisenheim - Alemanha, Proceedings, p.51, 2012.

HERNANDEZ, F.B.T.; NEALE, C.M.;U.; TEIXEIRA, A.H.C.; TAGHVAEIAN, S.; "Determining large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the northwest of São Paulo state, Brazil", **Acta Hortic**, P. Braun, p. 263-270, 2014.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª Edição traduzida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São Paulo, p. 672, 2009.

KLOCKE, N. L.; HUBBARD, K. G.; KRANZ, W. L.; WATTS, D. G. **Evapotranspiration (ET) or Crop Water Use**, 1996. Disponível em: <http://www.p2pays.org/ref/20/19769.htm>. Acessado em: 10 de fevereiro de 2017.

KING, D. **Remote sensing and agrometeorological models for yield forecasts**. Ispra: Joint Research Centre, 25p., 1989.

MERCANTE, E.; LAMPARELLI, R. A. C.; URIBEOPAZO, M. A.; ROCHA, J. V. Modelos de regressão lineares para estimativa de produtividade da soja no oeste do Paraná, utilizando dados espectrais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 504-517, 2010.

MORAES, A.V. C. **Desenvolvimento e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto, SP**. 1998. 95f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz - Esalq, Piracicaba.

MORAIS, N. B.; BEZERRA, F. M. L.; MEDEIROS, J. F.; CHAVES, S. W. P. Resposta de plantas de melancia cultivadas sob diferentes níveis de água e de nitrogênio. **Revista Ciência Agronômica**, v.39, p.369-377, 2008.

MOTA, F.S. **Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil**. In: VERNETTI, F.J. (Coord.) Soja. Campinas: Fundação Cargill, p.91-126, 1983.

MOURA, M.A.L. **Balanço de radiação e fluxo de energia à superfície em áreas de florestas nativas e pastagem no oeste da Amazônia brasileira**. Botucatu, 1999, 116f. Faculdade de Ciências Agronômicas, Tese (Doutorado em Agronomia) – UNESP.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de plantas de lavouras da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, 2005.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B. **Estresses de ordem ecofisiológica**. In: BONATO, E.R. (Ed.) Estresses em soja. Passo Fundo: Embrapa Trigo, p.45-65, 2000.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 183p., 1997.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária Ltda, 2002.

PICINI, A.G. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro (Coffea arabica L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. 1998. 132f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"- Esalq, Piracicaba.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J. V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.8, p.1075-1083, 2008.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.36, n.19-20, p. 2759-2781, 2005.

REIS, E. F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G. O.; PEZZOPANE, J. E. M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. **Idesia**, v.25, p.75-84, 2007.

RITCHIE, S. W.; THOMPSON, H. E.; BENSON, G. O. **Como a planta de soja se desenvolve**. Tradução de: [Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato]. Piracicaba, SP: POTAFOS, 21 p.,1997.

SAKURATANI, T. Separate estimation of transpiration and evaporation from soybean field without water shortage. **Journal of Agricultural Meteorology**. Amsterdam,v.42,p. 309-317, 1987.

SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.;SOUZA, J. M. F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 629-640, 2017

SANTANA, M. J.; CARVALHO, J. A.; ANDRADE, M. J. B.; GERVÁSIO, G. G.; BRAGA, J. C.; LEPRI, E. B. Viabilidade técnica e econômica da aplicação de água na cultura do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciências e Agrotecnologia**, v.33, p.532-538, 2009.

SANTOS, J.B.; PROCOPIO, S.O.; SILVA, A.A.; COSTA; L.C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas.**Bragantia**, Campinas,v. 62, n.1, p. 147-153, 2003.

SAUER, T.J., SINGER, J.W., PRUEGER, J.H., DESUTTER, T.M.; HATFIELD, J.L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam,v.145,p. 206-214,2007.

SCHNEPF, R. D.; DOHLMAN, E.; BOLLING, C. Agriculture in Brazil and Argentina: Developments and Prospects for Major Field Crops. Market and Trade Economics

Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture (USDA), **Agriculture and Trade Report**. WRS-01-3,2001.

SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Contribuição relativa da temperatura do ar no desenvolvimento de três cultivares de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 97-104, 2002.

SEDIYAMA, G.C.; RIBEIRO, A.; LEAL, B.G. Relações Clima-Água-Planta. Cap. 2, pag. 46-85. In: **Manejo da Irrigação**. Editor: FARIA, M. A. et. al. Lavras: UFLA/SBEA, 368p.,1998.

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

SILVA, A.J.; CANTERI, M.G.; SANTIAGO, D.C.; HIKISHIMA, M.; SILVA, A.L. A reflectância na estimativa do efeito de fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja. **Summa Phytopathologica**, v. 35, n. 1, p. 53-56, 2009.

SIONIT, N.; KRAMER, P.J. Effect of water stress durin different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.69, n.2, p.274-278, 1977.

SMIDERLE, O. J.; GIANLUPPI, V.; GIANLUPPI, D.; MARSARO JÚNIOR, A. L.; ZILLI, J. E.; NECHET, K. L.; BARBOSA, G. F.; MATTIONI, J. A. M. **Cultivo de soja no cerrado de Roraima**. Sistema de Produção, Boa Vista: Embrapa Roraima, 2009.

SOUZA, J.M.F.; ALVES JUNIOR, J.; SALES, D.L.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A.W.P.; PEREIRA, R.M. Determinação da evapotranspiração atual do feijoeiro irrigado utilizando sensoriamento remoto e a equação de Penman-Monteih. In: II Inovagri international meeting, Fortaleza.2015.

SOUZA, P.J.O.P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P.; BOTELHO, M.N.; SOUSA, A.M.L.; SOUZA, E.B.; FARIAS, J.R.B. Impacts of Soybean expansion on the Amazon energy balance: a case study. **Experimental Agriculture**.p. 553-567, 2011. Disponível em : <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672013000200006>.

SOUZA, J.D.; SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM – Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, v. 23, n. 4, p. 349-358, 2005.

SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, p. 417-427, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução de: Elaine Romanato Santarém et al., Porto Alegre: Artmed, 3. ed., 719p., 2004.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSEN, W. G.M.; AHMAD, M.D.; MOURA, M. S.B.; BOS, M.G. "Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil", **Journal Hydrology**. Amsterdam, p. 110-127, 2008.

TEIXEIRA, A.H.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**. Petrolina, n. 2, p.1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A.H.C. Modelling Evapotranspiration by Remote Sensing Parameters and Agrometeorological Stations. In. **Remote Sensing and Hydrology**; Neale, C.M.U.; Cosh, M.H., Eds.: IAHS Publ. 352; IAHS, Wallingford, UK, p. 154-157, 2012.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of fast land use changes in the semi-arid region of Brazil. In: SPIE Remote Sensing, Edinburgh. Proc. SPIE 8531, **Remote Sensing for Agriculture**, v. 8531. p. 1-10, 2012.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L.H. **Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 32 p., 2013.

TEIXEIRA, A.H.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L.; SHERER-WARREN, M.; 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.). 1ed.Boca Raton, Florida, USA: CRC Group, Taylor and Francis, p.165-187, 2014.

TEIXEIRA, A.H.C.; LEIVAS, J.F.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R. A.M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal Application Remote Sensing**, doi: 10.1117/1.JRS. 2017.

THORNTON, W.C.; HOLMAN, B. **Measurement of evaporation from land and water surface.**Washington: USDA Technical Bulletin, n. 817, p. 4-11, 1944.

THORNTON, C. W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, p. 55-94, 1948.