



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO SAFER NA
OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL
DAS CULTURAS EM CONDIÇÕES DE CERRADO**

JOÃO MAURÍCIO FERNANDES SOUZA

Orientador:

Prof. José Alves Júnior

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Nome completo do autor: João Maurício Fernandes Souza

Título do trabalho: Aplicação do algoritmo SAFER na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de Cerrado

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor (a) ²

Data: 27 / 10 / 2016

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

²A assinatura deve ser escaneada.

JOÃO MAURÍCIO FERNANDES SOUZA

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO SAFER NA OBTENÇÃO DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL DAS CULTURAS EM
CONDIÇÕES DE CERRADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para à obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. José Alves Júnior

Co-orientador:

Prof. Dr. Derblai Casaroli

Goiânia, GO – Brasil

2016

Ficha catalográfica a ser elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo autor, sob orientação do Sibi/UFG

Souza, João Maurício Fernandes Souza
Aplicação do algoritmo SAFERna obtenção da
evapotranspiração atual das culturas em condições de
Cerrado / João Maurício Fernandes Souza – 2016.
92 f.: il.

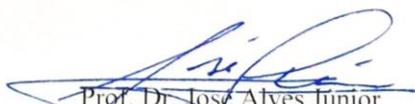
Orientador: Prof. Dr. José Alves Junior. Co-orientador:
Prof. Dr. Derblai Casaroli
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás.
Escola de Agronomia, Goiânia, 2016.
Bibliografia. Anexos.
Inclui lista de figuras, lista de tabelas, anexos.

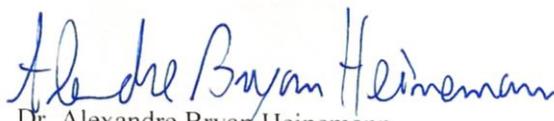
1. manejo da irrigação 2. sensoriamento remoto 3.
demanda hídrica 4. Kc I. Universidade Federal de Goiás.
II. Alves Júnior, José, orient. III. Casaroli, Derblai, co-
orient. IV. Título.



ATA DE DEFESA DE TESE

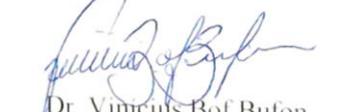
Aos três dias do mês de março do ano de dois mil e dezesseis (03.03.2016), às 13h30min, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Prof. Dr. José Alves Júnior - Orientador/Presidente, Prof. Dr. Derblai Casaroli, Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista, Prof. Dr. Pedro Rogério Giongo, Prof. Dr. Vinícius Bof Bufon e Dr. Alexandre Bryan Heinemann, para, em sessão pública realizada no auditório do PPGA da Escola de Agronomia da UFV, procederem à avaliação da defesa de Tese intitulada: **"APLICAÇÃO DO ALGORITMO SAFER NA OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL DAS CULTURAS EM CONDIÇÕES DE CERRADO"**, de autoria de **João Maurício Fernandes Souza**, discente do curso de **Doutorado**, na área de Concentração em **Solo e Água**, do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás. A sessão foi aberta pelo presidente, que fez a apresentação formal dos membros da Banca e deu início às atividades relativas à defesa da Tese. Passou a palavra ao doutorando que em quarenta minutos apresentou o seu trabalho. Após a apresentação o candidato foi arguido sucessivamente pelos membros da banca. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa. O título da tese foi alterado para: **"Modelo SAFER para a estimativa da evapotranspiração atual no cerrado goiano"**. De acordo com a Resolução nº 1051, de 09.09.2011 do CEPEC - Conselho de Ensino, Pesquisa, Extensão e Cultura, que regulamenta o Programa de Pós-Graduação em Agronomia, a Banca Examinadora considerou **APROVADA** a Tese, desde que procedidas às correções recomendadas, estando integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOCTOR** em Agronomia, na área de concentração em **SOLO E ÁGUA**, pela Universidade Federal de Goiás. O doutorando deverá efetuar as modificações sugeridas pela Banca Examinadora e encaminhar a versão definitiva da tese à Secretaria do PPGA, no prazo máximo de trinta dias após a data da Defesa. A conclusão do Curso e a emissão do Diploma dar-se-ão após o cumprimento do Artigo 69, § 1º e § 2º, da Resolução CEPEC nº 1051, de 09.09.2011. A Banca Examinadora recomendou a publicação de artigo(s) científico(s), oriundo(s) dessa tese, em periódicos de circulação nacional e, ou, internacional, depois de efetuadas as modificações sugeridas. No caso do discente titulado não providenciar a publicação de seu trabalho final em forma de artigo(s) científico(s) no prazo de seis meses, após a data da defesa, serão aplicados os dispositivos do Artigo 70, § 1º e § 2º, da mesma Resolução. Para finalizar, o Presidente agradeceu os membros examinadores, congratulou-se com o doutorando e encerrou a sessão às 18h10min. E para constar, eu Welinton Barbosa Mota, secretário do PPGA, lavrei a presente Ata que depois de lida e aprovada, será assinada pelos membros da Banca Examinadora, em quatro vias de igual teor.


Prof. Dr. José Alves Júnior
Presidente - EA/UFV


Dr. Alexandre Bryan Heinemann
Membro - Embrapa Arroz e Feijão


Prof. Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista
Membro - EA/UFV


Prof. Dr. Derblai Casaroli
Membro - EA/UFV


Dr. Vinícius Bof Bufon
Membro - Embrapa Cerrados


Prof. Dr. Pedro Rogério Giongo
Membro - UEG/Santa Helena

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)

AGRADECIMENTOS

Talvez esta seja a mais complexa parte da tese para escrever, simplesmente porque a vida não se coloca em um gráfico, da mesma forma que é impossível definirmos a significância das pessoas nessa trajetória.

Esta não foi uma caminhada breve, mas uma travessia que parecia sem fim, principalmente pelas intercorrências pessoais de toda ordem, que me atropelaram. Esses percalços, longe de obscurecerem o trajeto me impulsionaram com mais força. O desafio não foi pequeno, mas as motivações foram sempre grandiosas. Chegando ao fim dessa caminhada dedico algumas palavras àqueles que dela fizeram parte direta ou indiretamente.

A meus pais, João e Noemia, os mais profundos agradecimentos por refletirem o esplendor de uma vida reta e honesta e por não terem medido esforços para que eu pudesse alcançar voos mais altos, infundindo-me a confiança necessária para realizar os meus sonhos.

A minha irmã Fernanda, pelas palavras de conforto e apoio incondicional na execução deste trabalho.

Minha gratidão ao professor Dr. José Alves Junior, meu orientador, que tive a oportunidade de conhecer ainda na graduação e desde então tomado como exemplo na minha vida acadêmica e profissional. Seu comprometimento e sua forma de ensinar justifica não só a minha admiração bem como de todos os seus colegas e alunos. Sua disponibilidade irrestrita, sua forma crítica, inteligente e criativa de arguir as ideias apresentadas deram norte a este trabalho, facilitando o alcance de seus objetivos.

Agradeço ao professor Dr. Derblai Casaroli, co-orientador deste trabalho, suas ricas sugestões, bem como seus questionamentos sem dúvida serviram de incentivo a concretização desse trabalho.

Agradeço ainda aos professores Adão Wagner e Lucas Vellame, que dentro de suas especialidades diversas vezes “iluminaram” pontos até então obscuros que permearam a execução deste trabalho.

Agradeço ainda a toda equipe do LHI da UNESP de Ilha Solteira, em especial ao prof. Dr. Fernando Tangerino e ao Daniel Noe, que tão prontamente me receberam e irremediavelmente contribuíram para a execução desse trabalho.

E como não poderia deixar de ser, agradeço aos Nuclirh's Marcus, Pedro Henrique e Gustavo que tornaram meu cotidiano mais leve graças ao entusiasmo e à boa vontade em me auxiliar na condução deste e de tantos outros trabalhos. E aos colegas de pós-

graduação: Rodrigo, Talita, Déborah, Jordana, Cláudia Milene, Larissa, Dayane, obrigado pelo convívio, solidariedade e amizade compartilhadas durante todo esse tempo.

Aos amigos de ontem, de hoje e de sempre: Raphaela Christina, João Asmar, Evandro, Grazielle, Mateus, Liliane, Shantala, Juliana, Camila, Neyber, Tuani, Virgínia, obrigado por permitirem o nosso encontro. Com vocês vivi momentos dos quais não queria que acabassem e compartilhei lugares dos quais não queria sair.

Agradeço ainda aos colegas de profissão e amigos que encontrei ao longo dessa jornada, professores: Roberto, Josana, João Darós, Klênia, Juliene, Thiago, Cláudia, Yanuzi, Ricardo e toda equipe da Unievangélica que tão bem me acolheram nessa família.

E a todos aqueles que, embora não nomeados, me brindaram com seus inestimáveis apoios em distintos momentos, o meu muito obrigado! Todos vocês são co-autores deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	11
RESUMO GERAL.....	12
GENERAL ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	16
2.1.1 Métodos de estimativa	17
2.1.2 Balanço hídrico	19
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO	23
2.2.1 Sensoriamento remoto aplicado a estimativa da evapotranspiração ...	24
2.2.2 O SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving)	26
2.2.2.1 Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância	26
2.2.2.2 Cálculo de reflectância	28
2.2.2.3 Albedo no topo da atmosfera	28
2.2.2.4 Albedo de superfície	29
2.2.2.5 Temperatura de superfície	29
2.2.2.6 Índice de vegetação de diferença normalizada-NDVI	30
2.2.2.7 Evapotranspiração atual em escala regional utilizando o algoritmo SAFER.....	30
2.4 REFÊRENCIAS	31
3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA ESTIMADA PELO MODELO SAFER EM COMPARAÇÃO COM O MÉTODO PADRÃO FAO 56 NO CERRADO.....	36
RESUMO.....	36
ABSTRACT.....	36
3.1 INTRODUÇÃO.....	37
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
3.4 CONCLUSÃO	58
3.5 REFERÊNCIAS.....	58

4	VALIDAÇÃO DO MODELO SAFER NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-ÁÇUCAR, EM CULTIVO DE SEQUEIRO	62
	RESUMO.....	62
	ABSTRACT.....	62
4.1	INTRODUÇÃO.....	63
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	65
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
4.4	CONCLUSÃO.....	84
4.5	REFERÊNCIAS.....	84
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
6	ANEXO	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Descrição das bandas do Mapeador Temático (OLI) do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração para albedo e irradiancias espectrais no topo da atmosfera (TOA)	27
Tabela 3.1	Descrição da localização do estudo, com destaque para coordenadas geográficas, as culturas estudadas, tamanho das áreas e o período de avaliação.....	40
Tabela 3.2	Coeficiente de cultura (K_c), para cada fase de desenvolvimento das culturas avaliadas, cana-de-açúcar, feijão, tomate e trigo, em Goiás em 2014/2015.....	41
Tabela 3.3	Acumulado de precipitação, ET_0 , ET_c e irrigação das culturas avaliadas, cana-de-açúcar, feijão, tomate e trigo, na região de estudo em 2014/2015	46
Tabela 3.4	Evapotranspiração do feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), respectivamente, 2014/2015.....	47
Tabela 3.5	Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de evapotranspiração obtidas pelo padrão FAO 56 e o SAFER.....	55
Tabela 4.1	Classificação textural, teor de argila, areia, silte e matéria orgânica na área de estudo.....	67
Tabela 4.2	Coeficiente de cultura (K_c), para cada fase de desenvolvimento da cultura cana-de-açúcar (1ª soca).....	71
Tabela 4.3	Componentes do balanço hídrico em cana-de-açúcar de 23 de maio a 27 de agosto de 2015 na camada de 0-0,60 m, Santo Antônio de Goiás, GO.....	76
Tabela 4.4	Evapotranspiração de referência (ET_0), Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (ET_{SAFER}) nas datas e pontos amostrados nas imagens do satélite Landsat 8 em comparação com o balanço hídrico climatológico (ET_{BHC}) e o balanço hídrico do solo (ET_{BHS}).....	79
Tabela 4.5	Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de evapotranspiração obtidas pelo balanço hídrico do solo e o SAFER.....	81

Tabela 4.6	Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de evapotranspiração obtidas pelo balanço hídrico climatológico e o SAFER.....	82
Tabela 6.1.	Parâmetros da curva de retenção de água no solo média da área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, (16° 29' S; 49° 18' W; 780 m).....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma esquemático para o cálculo da evapotranspiração real por meio do algoritmo SAFER.....	31
Figura 3.1	Mapa de localização da área de estudo, região de Cerrado.....	39
Figura 3.2	Localização das áreas de estudo, pivôs centrais avaliados com feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar (1ª soca).....	40
Figura 3.3	Evapotranspiração do feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar referente ao período de junho a setembro de 2014 obtida pelo SAFER nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.....	48
Figura 3.4	Comparativo entre a ET estimada pelo método padrão (FAO-56) e a ET utilizando o SAFER, em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.....	51
Figura 3.5	Comparativo entre o Kc (boletim FAO 56), para a cultura de tomate industrial (a), trigo (b), feijão (c) e cana-de-açúcar em 2ª soca (d) e o Kc utilizando o SAFER, em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.....	53
Figura 3.6	Comparativo da ETc determinada pelo método padrão (FAO-56), e a ETSAFER, em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas de feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.....	54
Figura 4.1	Localização da área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, (16° 29' S; 49° 18' W; 780 m).....	65
Figura 4.2	Área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, (16° 29' S; 49° 18' W; 780 m).....	66
Figura 4.3	Conjunto de sensores EC-5, Pluviômetro ECRN-50 e datalogger EM50.....	68
Figura 4.4	Valores médios diários da precipitação pluvial (P), da variação na umidade do perfil (0-0,60 m), valores médios de Θ_{CC} , $\Theta_{Crítico}$ e Θ_{PMP} , no período de 22/05/2015 a 27/08/2015.....	78
Figura 4.5	Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (CTC 4) estimada pelo SAFER (ET_{SAFER}) nas datas e pontos amostrados nas imagens em	79

	comparação com o balanço hídrico climatológico (ET_{BHC}) e o balanço hídrico do solo (ET_{BHS}), Santo Antônio-GO, 2015.....	
Figura 4.6	Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (CTC 4) referente ao período de maio a agosto de 2015 obtida pelo SAFER na área delimitada para o estudo, utilizando imagem Landsat-8, Santo Antônio-GO, 2015.....	80
Figura 4.7	Comparativo da evapotranspiração real determinada pelo balanço hídrico do solo (ET_{BHS}), e a ET_{SAFER} , em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	81
Figura 4.8	Comparativo da evapotranspiração real determinada pelo balanço hídrico do solo (ET_{BHS}), e a ET_{SAFER} , em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	82
Figura 6.1	Curva de retenção de água no solo média da área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, (16° 29' S; 49° 18' W; 780 m).	91

RESUMO GERAL

SOUZA, J. M. F. **Aplicação do algoritmo SAFER** (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) **na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de Cerrado**. 2016. 92 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.¹

As informações agrometeorológicas auxiliam o gerenciamento dos recursos hídricos e possibilitam o manejo eficiente do uso da água na agricultura irrigada. Sendo os dados de evapotranspiração (ET) frequentemente utilizados como critério fundamental nas operações de irrigação, no cálculo do balanço hídrico e no zoneamento agroclimatológico. Portanto, a estimativa da evapotranspiração de cultura em escala regional, com base em imagens de satélite representam uma grande contribuição aos estudos referentes a gestão dos recursos hídricos, pois são capazes de propiciar a sua estimativa em áreas com grande heterogeneidade e dimensão, ao contrário de métodos micrometeorológicos e mesmo o de medidas diretas com lisímetros. Em relação a outros modelos que utilizam o balanço de energia, o SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) possui uma parametrização mais simples, necessitando apenas de dados remotos de albedo, NDVI e temperatura de superfície. O SAFER tem ainda a vantagem adicional do uso de dados de ambos os tipos de estações agrometeorológicas, convencionais e automáticas. Essa característica é importante por possibilitar a avaliação das tendências históricas dos componentes do balanço de energia em larga escala ao longo dos anos, visto que sensores automáticos são avanços relativamente recentes na tecnologia instrumental. Considerando-se a recente elaboração do SAFER, não existem muitos estudos comparativos de avaliação do seu desempenho. Dessa forma, os objetivos deste estudo foram: estimar a evapotranspiração de cultura e seu respectivo Kc nas diferentes fases fenológicas, em áreas de cultivo sem restrição hídrica na região do Cerrado goiano, aplicando técnicas de sensoriamento remoto, para validação do modelo SAFER em comparação com o método padrão FAO 56, utilizando monitoramento agrometeorológico e após a avaliação da confiabilidade do modelo, realizar um comparativo entre o método de estimativa de ETreal obtida pelo SAFER, com o balanço hídrico climatológico e o balanço de água no solo em uma área de sequeiro de forma a validar a metodologia proposta como uma alternativa aos métodos tradicionais. A estrutura deste estudo é a seguinte: após a introdução e revisão bibliográfica sobre o tema, no primeiro capítulo são apresentados os dados da calibração do SAFER e sua aplicação nas culturas de feijão, tomate, cana-de-açúcar e trigo no Cerrado goiano, tomando-se como referência as estimativas de requerimento hídrico utilizando a metodologia da FAO; e em seguida, após comprovação de eficiência, no segundo capítulo são apresentados os resultados da aplicação do SAFER em uma área de sequeiro cultivada com cana-de-açúcar de forma a apresentá-lo como uma alternativa aos métodos tradicionais.

Palavras-chave: manejo da irrigação, sensoriamento remoto, demanda hídrica, Kc

¹ Orientador: Prof. Dr. José Alves Júnior. EA/UFG.

Co-Orientador: Prof. Dr. Derblai Casaroli. EA/UFG.

GENERAL ABSTRACT

SOUZA, J. M. F. **Application of algorithm SAFER in obtaining evapotranspiration crop in Cerrado conditions.** 2016. 92 f. Thesis (Master's degree in Agronomy: Soil and Water)-Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.¹

To realize an efficient management of water use in irrigated agriculture is important to obtain meteorological information to assist in the management of water resources. Since the data of evapotranspiration (ET) they are often used as a fundamental criterion in irrigation operations in the calculation of water balance and agroclimatic zoning. Therefore, the estimated evapotranspiration of culture on a regional scale, based on satellite images represent a great contribution to the studies on the management of water resources, being able to provide their estimate in areas with high heterogeneity and size, to Unlike micrometeorological methods and even of direct measures such as lysimeter. Compared to other models that use the energy balance, the SAFER (Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration) has a simpler parameter, requiring only the remote data of the albedo, NDVI and temperature. The SAFER still has the additional advantage of using data from both types of stations meteorological conventional and automatic. This feature is important because it allows the assessment of historical trends of energy balance components on a large scale over the years, given that automatic sensors are relatively recent developments in instrumental technology. Considering the recent development of SAFER, there are not many studies to assess its performance. The aim of this study was estimate the culture evapotranspiration and their respective Kc's in its different phenological phases without water restriction, in areas in Goias Cerrado region, using remote sensing techniques for validation of the agro-meteorological model SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) in compared to the method standard FAO 56. , using agro-meteorological monitoring and after evaluation of the model's reliability, make a comparison between the ETr estimation method obtained by SAFER, with the climatological hidric balance and the soil water balance in order to validate the proposed methodology as an alternative to methods traditional. The structure of this study is as follows: after the introduction and literature review on the topic, the first chapter presents the SAFER calibration data and its application in bean crop, tomato, sugarcane and wheat in Goias Cerrado, taking as reference the water requirement estimates using the FAO methodology; and then, after proof of efficiency, in the second chapter presents the SAFER application results in a dry area cultivated with sugarcane in order to present it as an alternative to traditional methods.

Key words: irrigation management, remote sensor, water requirement, crop coefficient

¹ Adviser: Prof. Dr. José Alves Júnior. EA/UFG.
Co-adviser: Prof. Dr. Derblai Casaroli. EA/UFG.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Para obter um manejo eficiente do uso da água na agricultura irrigada é importante a obtenção de informações agrometeorológicas que auxiliem no gerenciamento dos recursos hídricos. Sendo os dados de evapotranspiração (ET) frequentemente utilizados como critério fundamental nas operações de irrigação, no cálculo do balanço hídrico e no zoneamento agroclimatológico.

Métodos que possam determinar o balanço hídrico de culturas a partir de sensoriamento remoto se mostram muito úteis, por propiciar a sua estimativa em áreas com grande heterogeneidade e dimensão, ao contrário de métodos micrometeorológicos e mesmo o de medidas diretas com lisímetros. Esses métodos, apesar de precisos, apresentam dificuldade de espacialização, ou representam valores pontuais de localização específica apresentando resultados válidos para áreas com culturas com as mesmas condições fenológicas, hídricas, de configuração de plantio e, quando irrigadas, sujeitas a um mesmo sistema de irrigação (Bezerra et al., 2008; Giacomoni & Mendes, 2008).

Nas estimativas de evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto, tem-se utilizado métodos empíricos e físicos (Gowda et al., 2008; Kalman et al., 2008). Os métodos físicos são aqueles baseados no balanço de energia (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2007). A equação do balanço de energia pode ser resolvida por uma combinação de dados de sensoriamento remoto (albedo, emissividade e temperatura da superfície) com dados meteorológicos de superfície (radiação solar global e radiação de ondas longas incidente), ou, totalmente com dados de sensoriamento remoto (Bastiaanssen et al., 1998a). As estimativas de ET podem ser obtidas a partir de imagens de sensoriamento remoto, com aplicação de algoritmos aliados a modelos físicos (Andrade et al., 2014; Lopes, 2014), com destaque para o SEBS - Surface Energy Balance System (Su, 2002), SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen et al., 1998), METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) (Allen et al., 2007) e SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) (Teixeira et al., 2013a).

O SAFER é baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração em larga escala. Utiliza a forte correlação de alguns parâmetros

calculados por sensoriamento remoto como albedo, NDVI e temperatura da superfície, com a evapotranspiração. Para o modelo tornar-se aplicável em outros ecossistemas, há a necessidade de se fazer ajustes nos coeficientes da equação que relaciona a fração da evapotranspiração atual à de referência, com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, visto que o modelo foi desenvolvido para a região semiárida brasileira (Teixeira et al., 2012b) e posteriormente calibrado apenas para o noroeste paulista (Hernandez, 2014).

Dessa forma os objetivos desse estudo foram:

a) Estimar a evapotranspiração de cultura e seus respectivos K_c 's nas diferentes fases fenológicas, em áreas de cultivo sem restrição hídrica na região do Cerrado goiano, aplicando técnicas de sensoriamento remoto e o balanço de energia, para validação do modelo SAFER em comparação com o método padrão FAO 56, utilizando monitoramento agrometeorológico.

b) Realizar um comparativo entre o método de estimativa de E_{Tr} obtida pelo SAFER, com o balanço hídrico climatológico e o balanço de água no solo de forma a validar a metodologia proposta como uma alternativa aos métodos tradicionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evaporação é o processo físico pelo qual uma substância transita do estado líquido para o estado gasoso. Esta transição de fase ocorre sobretudo à superfície do globo, através dos oceanos, dos mares interiores, dos lagos, dos rios e dos solos. A transpiração é um processo físico pelo qual a água líquida que os seres vivos contêm é transformada em vapor de água no ar em seu redor. A evaporação e a transpiração exprimem-se em mm ou em $\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A evapotranspiração (ET) compreende a transferência de água da superfície do solo ou de água livre (evaporação) e a perda de água pela vegetação controlada pelos estômatos (transpiração) (Pereira et al., 1997). Esta transferência de água é condicionada fundamentalmente pelo estado físico da atmosfera, pelas características do solo e da cobertura vegetal, podendo ser verificado déficit ou excesso de água no local considerado, com variações intra e interanuais.

A evapotranspiração potencial (ET_p) é a evapotranspiração que ocorre sempre que a taxa de perda de água não é influenciada pelo teor de água disponível à superfície do solo e das plantas, isto é, sempre que a disponibilidade em água não constitui factor limitante. Por esta razão a evapotranspiração potencial é sinónimo de necessidade em água, a que permitiria ao solo manter permanentemente um teor de água ótimo correspondente à quantidade necessária para o bom desenvolvimento das plantas no solo.

A estimativa do consumo de água pelas culturas pode ser realizada a partir da evapotranspiração de referência (ET_0). A cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética, cujas características se assemelham, bem de perto, à evapotranspiração da grama. Isto permite que tais características (valores numéricos) mantenham-se como parâmetros constantes adotados no cálculo da ET_0 . Estes parâmetros, para a cultura hipotética, são: altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m^{-1} (Allen et al., 1998). Conhecendo-se a ET_0 , pode-se estimar o consumo de água de qualquer cultura a partir de um fator de correção, denominado coeficiente de cultivo

(Kc), que converte o consumo de referência obtido em condições climáticas locais em consumo de água pela cultura em seus diferentes estádios fenológicos. Logo, a ET_0 é um elemento indicativo da demanda hídrica potencial (ET_p) das culturas de um determinado local e período.

A evapotranspiração real (ET_r) corresponde a evapotranspiração de cada cobertura de solo ou cultura em qualquer estágio fenológico, podendo ou não estar com déficit hídrico ou outro fator que limita a sua taxa potencial (Allen et al., 1998). Em casos que a cultura apresenta total disponibilidade hídrica, através da relação ET_p/ET_0 chega-se ao valor de Kc que expressa a razão entre a ET_0 e a ET_p . Que varia para cada cultura, uma vez que a demanda hídrica da planta varia conforme a radiação solar incidente no local, tipo de solo, variedade e estágio fenológico.

Parâmetros agrometeorológicos, características da cultura, manejo e aspectos ambientais são fatores que afetam a ET, além da cobertura do solo, da densidade dos plantios, da arquitetura das plantas, do microclima e da umidade do solo. Os sistemas de condução e de irrigação também alteram o microclima local e o efeito da umidade do solo se manifesta principalmente pelo déficit hídrico e o tipo de solo. Os valores da ET_p podem desviar dos valores da ET de cultura, devido à ocorrência de pragas e doenças, salinidade do solo, baixa fertilidade do solo, deficiência ou excesso de água no solo (Teixeira et al, 2009).

2.1.1 Métodos de estimativa

O conhecimento da evapotranspiração é importante na escolha da época de plantio, estimativa da água a ser aplicada via irrigação ou técnicas que amenizem o déficit hídrico como a irrigação suplementar. Conhecer os processos de perda de água e os componentes que atuam de forma efetiva no balanço de água poderá ser de grande importância na diminuição ou perda de produtividade da cultura.

Foi levantado por Mello et al. (1996), que existem entre 50 a 60 equações para a estimativa da evapotranspiração. As equações são baseadas em dados meteorológicos para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0). Alguns dos métodos mais precisos são de difícil aplicação, não só pela complexidade dos cálculos, mas, também, por exigirem um grande número de dados meteorológicos, nem sempre disponíveis (Bernardo et al., 2008).

Os procedimentos clássicos utilizados para a determinação da evapotranspiração constituem-se dos métodos diretos, como os lisímetros, e os métodos indiretos, que estimam

a ET por meio de equações que utilizam dados medidos em estações meteorológicas. Experimentalmente, o cálculo da evapotranspiração pode ser feito com bastante precisão a partir de lisímetros de pesagem, drenagem e lençol freático constante e de métodos como o da correlação turbulenta e o da razão de Bowen (Allen et al., 2002; Tucci, 2007).

A evapotranspiração pode ser estimada pelos seguintes métodos (Pereira et al., 2002):

a) Empírico – que consiste nas correlações entre os elementos meteorológicos e a evapotranspiração, os métodos conhecidos são: Tanque Classe A, Thornthwaite, Simplificação de Camargo, Hargreaves & Samani, Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Linacre e Blaney-Criddle entre outros;

b) Aerodinâmico – nesse método a quantidade de água evaporada (ou evapotranspirada) (ET) depende do gradiente de umidade entre a superfície e o ar e da difusividade ao vapor de água da camada de ar envolvente (camada-limite). Segundo este método, o transporte de vapor de água entre uma superfície e o meio ambiente depende das características aerodinâmicas da camada-limite. A resistência da camada-limite pode ser avaliada a partir da dimensão característica da superfície em causa e de números adimensionais (nº de Sherwood, nº de Nusselt e nº de Lewis)

c) Balanço de energia – consiste na contabilização de todas as formas de energias que interagem com a superfície terrestre em condições atmosféricas normais, no qual a energia principal é a radiação solar que em função dos comprimentos de onda é chamada ondas curtas; e a superfície terrestre também emite radiação em comprimentos de ondas longas;

d) Combinados – combinam parte dos conceitos dos métodos empíricos com os conceitos do método de balanço de energia. O mais conhecido e utilizado desta categoria é o método de Penman-Monteith, que é considerado método padrão por pesquisadores da FAO.

A equação de Penman-Monteith é utilizada para calcular a evapotranspiração de superfícies vegetadas e não vegetadas (Equação 1), sendo obtida pela combinação dos métodos de balanço de energia e transferência de massa (Allen et al., 1998). Na equação de Penman-Monteith são consideradas duas resistências: aerodinâmica e superficial. A resistência superficial representa a resistência do fluxo de vapor entre a superfície e a atmosfera, sofrendo influência da abertura estomatal, do índice de área foliar, do tipo de solo

e seu teor de água. A resistência aerodinâmica descreve a resistência da vegetação ao deslocamento do vento.

$$ET_0 = \frac{0,408 \times (R_n - G) + \left[\gamma \times \left(\frac{900}{T + 273} \right) \times u_2 \times (e_s - e_a) \right]}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)} \quad [1]$$

Em que:

R_n é o saldo de radiação à superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

G é a densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

T é a média diária da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1});

e_s é a pressão de vapor de saturação do ar (kPa);

e_a é a pressão de vapor atual do ar (kPa);

$e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor de saturação do ar (kPa),

Δ é declividade da curva de pressão de vapor do ar na atmosfera ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

e) Correlação dos turbilhões – consiste no processo de fluxo turbulento, nas flutuações da velocidade vertical e nas propriedades do vapor d'água.

No entanto, esses métodos estão disponíveis para a escala de campo, sendo representativos exclusivamente para áreas de vegetação com as mesmas condições fenológicas e hídricas, não permitindo a estimativa do fluxo de evapotranspiração sobre grandes áreas geográficas (Bezerra et al., 2008).

2.1.2 Balanço hídrico

O planejamento hídrico é a base para se dimensionar qualquer forma de manejo integrado dos recursos hídricos, assim, o balanço hídrico permite uma primeira avaliação, na escala macro, da disponibilidade hídrica no solo ao longo do tempo. O balanço hídrico como unidade de gerenciamento, permite classificar o clima de uma região, realizar o zoneamento agroclimático e ambiental, o período de disponibilidade e necessidade hídrica no solo, além de favorecer ao planejamento integrado dos recursos hídricos (Lima & Santos, 2009).

A evapotranspiração e o déficit hídrico são os parâmetros indispensáveis para se determinar a necessidade de irrigação. A evapotranspiração é a contabilização da perda de água que foi evaporada do solo mais a transpiração da planta e que deve ser repostada pelas chuvas ou irrigação para que se tenha a expressão de toda a potencialidade produtiva de uma cultura.

A contabilização de água de uma determinada camada do solo permite definir os períodos secos (déficit hídrico) e úmidos (excedente hídrico) de um determinado local (Reichardt, 1990). De acordo com Pereira et al. (2002), os principais componentes do balanço hídrico para definir a demanda e disponibilidade hídrica é a precipitação (P), evapotranspiração real (ET_r), evapotranspiração potencial (ET_p), variação do armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC).

Equacionando-se as entradas e as saídas de água do sistema, tem-se a variação de armazenamento de água no solo que pode ser expressa pela Equação 2, abaixo.

$$\Delta ARM = P + O + I + Ri + DLi + AC - ET - Ro = DLo - DP \quad [2]$$

Em que:

P = precipitação pluviométrica

O = orvalho

I = irrigação

Ri = escoamento superficial

DLi = escoamento sub-superficial

AC = ascensão capilar

ET = evapotranspiração

Ro = escoamento superficial

DLo = escoamento sub-superficial

DP = drenagem profunda

A precipitação pluviométrica representa a principal entrada de água em um sistema, ao passo que a contribuição do orvalho só assume papel importante em regiões muito áridas, sendo assim desprezível. Caso a cultura seja irrigada deve-se considerar a lâmina aplicada como uma das entradas de água no sistema. As entradas de água pela

ascensão capilar também são pequenas e somente ocorrem em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos. Mesmo assim, a contribuição dessa variável é pequena, sendo também desprezível. Já os fluxos horizontais de água (R_i , R_o , D_{Li} e D_{Lo}), para áreas homogêneas, se compensam, portanto, anulando-se. A ET é a principal saída de água do sistema, especialmente nos períodos secos, ao passo que DP constitui-se em outra via de saída de água do volume controle de solo nos períodos excessivamente chuvosos.

Uma das formas de se contabilizar o balanço de água no solo é por meio do método proposto por Thornthwaite & Mather (1955), denominado de Balanço Hídrico Climatológico, no qual a partir dos dados de P, de ET e da CAD (capacidade de armazenagem de água no solo), chega-se aos valores de disponibilidade de água no solo (Armazenamento = ARM), de alteração do armazenamento de água do solo ($ALT = \Delta ARM$), de evapotranspiração real (ETr), de deficiência hídrica (DEF) e de excedente hídrico ($EXC = DP$).

O conhecimento destes fatores favorece ao planejamento agropecuário e as práticas de controle de produção, ou seja, disponibilizar e conhecer informações que permitem aos produtores identificar as fragilidades climáticas é essencial para o sucesso de um empreendimento agrícola, que incluem a decisão de optar ou não por sistemas de irrigação para suprir a deficiência hídrica.

Os equipamentos comumente utilizados para determinação da evapotranspiração através do método do balanço hídrico são os denominados evapotranspirômetros ou lisímetros, os quais são tanques cheios com solos, onde a cultura se desenvolve com sua zona de raiz isolada do seu meio ambiente. Os lisímetros podem ser do tipo: pesagem, lençol freático constante, flutuação e drenagem. Nos lisímetros, a medida da evapotranspiração é determinada pela diferença da massa do lisímetro em medições consecutivas. As perdas de água são diretamente medidas pela troca de massa, e isso proporciona a obtenção da evapotranspiração com uma precisão de alguns centésimos de milímetro, em um determinado período de tempo. De acordo com Allen et al. (1998), o lisímetro representa o melhor método para medir com precisão a perda de água do solo e da superfície das culturas, e tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento e validação de testes micrometeorológicos teóricos que visam determinar a evapotranspiração, desde que a vegetação dentro e imediatamente fora do lisímetro seja perfeitamente emparelhada (mesma altura e índice de área foliar).

O método do balanço hídrico no solo vem sendo utilizado devido ser mais de menor custo que os lisímetros de pesagem e que os métodos micrometeorológicos, além de apresentar uma boa concordância quando comparado com esses métodos. Para efetuar o balanço hídrico é necessário medir o conteúdo de água do solo, sendo que as técnicas de medição do conteúdo de água variam de amostragem direta, tais como o método gravimétrico, a amostragem indireta, tais como a atenuação de raios gama, sonda de nêutrons (SN) e vários sensores incluindo blocos de resistência e sondas de TDR (reflectometria no domínio do tempo), que podem ser instalados em várias profundidades. O método gravimétrico, apesar de ser considerado padrão, normalmente é evitado, pois é demorado, destrutivo e não permite a repetição da amostragem no mesmo local (Almeida, 2012).

De acordo com Souza & Matsura (2002), vários métodos têm sido utilizados para quantificar a umidade do solo como alternativa ao método gravimétrico, como a sonda de nêutrons, resistência elétrica, reflectometria no domínio do tempo (TDR) e a reflectometria no domínio da frequência (FDR) que apresentam a grande vantagem de permitir o monitoramento do conteúdo de água no solo, a fim de manejar a irrigação deficitária e caracterizar a resposta das culturas ao estresse hídrico, visto que, os tensiômetros nos períodos mais críticos perdem a escorva (-80 kPa).

O uso de equipamentos baseados na reflectometria no domínio da frequência (FDR) tem ganhado destaque, pois além de terem se mostrado precisos, são de leitura rápida e não destrutivos, o que permite, por exemplo, monitorar o conteúdo de água no solo, em uma determinada profundidade e período de tempo, possibilitando o cálculo da variação de armazenamento de água no solo, fundamental em estudos relacionados ao balanço hídrico em diversas culturas, estimar os locais específicos para a produtividade ideal da cultura e a eficiência da irrigação, prever a data (ou período) e a quantidade necessária da irrigação, padrões de extração de diferentes camadas do perfil do solo (após a irrigação ou chuva), início do estresse hídrico da cultura e ainda o desempenho dos sistemas de irrigação.

A medida do teor de água do solo a partir da determinação da capacitância não é algo recente, tendo como exemplos os trabalhos desenvolvidos por Anderson & Edlefsen (1942), Anderson (1943) e Plater (1955). O uso dessa técnica tem se expandido em virtude principalmente do desenvolvimento de osciladores de alta frequência (50 a 150 MHz) mais precisos e com menor custo, principalmente em aplicações na agricultura irrigada como, por exemplo, os trabalhos conduzidos por Freitas et al. (2009), Cruz et al. (2010) e Freitas et al. (2012).

Os sensores FDR, conhecidos também como sensores de umidade do solo por capacitância, tem tido como principais vantagens, segurança ao operador em virtude de não utilizar fonte radioativa, como a sonda de nêutrons (Andrade Junior et al., 2008). A sonda de capacitância é composta por um par de elétrodos de placas ou elétricos que funcionam como um capacitor eletrônico. A matriz de solo-água-ar quando ativada funciona como um dielétrico (isolante) do capacitor e completa um circuito oscilante (Heng et al., 2002).

Alterações na frequência de ressonância (F) do circuito depende das mudanças na capacitância, que aumenta consideravelmente com um aumento no número de moléculas de água livres e com seus dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor, de acordó com a Equação 3 (Paltineanu & Starr, 1997):

$$F = [2\pi\sqrt{LC}]^{-1} \quad [3]$$

Em que:

L = indutância do circuito (H);

C = capacitância total, respectivamente (F).

Recentes avanços na microeletrônica têm proporcionado a popularização das sondas por capacitância para o monitoramento, “in loco”, do teor de água no solo. Entretanto, os sensores de capacitância necessitam ser calibrados para fornecer leituras precisas da umidade do solo. Apesar de ser fornecida uma equação de calibração universal, pelo fabricante, os trabalhos de Paltineanu & Starr (1997); Morgan et al. (1999); Baumhardt et al. (2000); Groves & Rose (2004), Silva et al. (2007) e Andrade Junior et al. (2008), ressaltam que calibrações locais podem melhorar a precisão de leitura do equipamento apesar destas se apresentarem como trabalhosas e onerosas.

Segundo Starr & Partineanu (1998) as sondas por capacitância apresentam erro padrão muito próximos às sondas TDR (0,02 a 0,005m³m⁻³); possibilitam monitorar o teor da água no solo a um distância de até 500 m entre o sistema de coleta de dados e o sensor enquanto que no TDR o comprimento máximo do cabo é de 25m, porém, são mais susceptíveis aos efeitos da salinidade do solo e temperatura (Baumhardt et al., 2000).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O uso do sensoriamento remoto a partir de imagens de satélite vem se demonstrando uma ferramenta interessante para a quantificação do balanço de energia.

Apresentando como grande vantagem o fato de poder ser utilizada não só em larga escala espacial como temporal, permitindo o estudo ao longo do período desejado, podendo assim, verificar as alterações meso-climáticas causadas pela mudança do uso da terra ao longo dos anos. (Compaoré et al., 2008). Este método tem demonstrado ser uma alternativa para as estimativas de evapotranspiração, em face às dificuldades de medição apresentadas pelos métodos diretos e à dificuldade de espacialização dos resultados obtidos pelos métodos clássicos indiretos, por representarem valores pontuais de localização específica (Bezerra et al., 2008; Giacomoni & Mendes, 2008).

2.2.1 Sensoriamento remoto aplicado a estimativa da evapotranspiração

Nas estimativas de evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto, tem-se utilizado métodos empíricos e físicos (Gowda et al., 2008; Kalman et al., 2008). Os métodos físicos são aqueles baseados no balanço de energia (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2007). A equação do balanço de radiação pode ser resolvida por uma combinação de dados de sensoriamento remoto (albedo, emissividade e temperatura da superfície) com dados de campo (radiação solar global e radiação de ondas longas incidente), ou, totalmente com dados de sensoriamento remoto (Bastiaanssen et al., 1998a).

Os componentes do balanço de energia incluem todas as formas de transformação da irradiância incidente sobre a superfície, podendo ser refletida, absorvida e emitida, ou consumida na evaporação, ou no fluxo de calor na atmosfera e no solo. A energia não se perde. A radiação incidente sofre transformações que dependem do material constituinte da superfície terrestre e da presença de água (Warren et al., 2014).

O fluxo de calor latente, corresponde à energia consumida pelo processo de evapotranspiração, sendo obtido pela equação de balanço de energia uma vez conhecidos o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação (Equação 4):

$$\lambda E = R_n - G - H \quad [4]$$

Em que:

λE = fluxo de calor latente, $W m^{-2}$,

R_n = saldo de radiação, $W m^{-2}$;

G = fluxo de calor no solo, $W m^{-2}$;

H = fluxo de calor sensível, $W m^{-2}$.

Algoritmos como o SEBS - Surface Energy Balance System (Su, 2002), SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b, 2014) e METRIC – Mapping Evapo Transpiration at high Resolution with Internalized Calibration (Allen et al., 2007) utilizam o balanço de energia para estimar a evapotranspiração real, obtendo o fluxo de calor latente a partir da aplicação da equação de balanço de energia.

O saldo de radiação (Equação 5), que representa a energia radiante disponível para os processos biofísicos (Campbell & Norman, 1998), é calculado pela diferença entre os fluxos radiantes refletidos ou emitidos pela superfície e os fluxos radiantes incidentes na mesma superfície apresentando pequenas diferenças entre um algoritmo e outro.

$$R_n = RS \downarrow - \alpha RS \downarrow + RL \downarrow - RL \uparrow - (1 - \varepsilon_0) RL \downarrow \quad [5]$$

Em que:

$RS \downarrow$ = radiação em ondas curtas incidente, $W m^{-2}$;

α = albedo, adimensional;

$RL \downarrow$ = radiação em ondas longas incidente, $W m^{-2}$;

$RL \uparrow$ = radiação emitida em ondas longas, $W m^{-2}$;

ε_0 = emissividade da superfície, adimensional.

A partir de técnicas de sensoriamento remoto, pode-se estimar ainda os valores de albedo e emissividade. A emissividade da superfície tem sido estimada por meio de equações empíricas utilizando índices de vegetação (Bastiaanssen et al., 1998a; 1998b; Allen et al., 2007). Enquanto o albedo tem sido estimado por meio da combinação linear da refletância bi-direcional de diferentes bandas espectrais situadas entre o visível e o infravermelho próximo (Tasumi et al., 2008) e fatores de correção para cada sensor utilizado (Van Hellemont & Ruddick, 2014).

Neste contexto, muitos trabalhos foram desenvolvidos nestes últimos anos, inclusive na própria região de estudo, utilizando o algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL (Baastiansen et al., 1998), que exige a presença de condições hidrológicas extremas dentro da cena, podendo levar a uma menor precisão dos dados, caso o operador não possua a prática necessária no momento da escolha dos pixels quente e frio, especialmente em época chuvosa, quando ocorrem valores de fluxo de calor latente similares na imagem.

Dessa forma, optou-se para a realização deste trabalho a utilização do Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving – SAFER. O modelo SAFER foi desenvolvido por Teixeira (2010), para obter a fração da evapotranspiração de referência aplicando-o inicialmente no Submédio São Francisco, calibrando o modelo a partir de experimentos agro-meteorológicos. Nesse modelo, a fração evapotranspirativa [$EF = \lambda E / (R_n - G)$] é utilizada conjuntamente com estações meteorológicas para extrapolar dados instantâneos de evapotranspiração para maiores escalas temporais.

Em relação a outros modelos que utilizam o balanço de energia, o SAFER possui uma parametrização mais simples, necessitando apenas de dados remotos de albedo, NDVI e temperatura. Esse modelo dispensa a calibração usando condições extremas (pixel quente e pixel frio), o que possibilita sua aplicação mesmo na época chuvosa, período este em que não se pode assumir valor nulo para o fluxo de calor latente do pixel quente. que possui uma aplicação mais simples, necessitando apenas dos dados de evapotranspiração de referência (ET_0), radiação global (R_g) e temperatura média do ar (T_a) obtidos através de estações agrometeorológicas para juntamente com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, chegando ao balanço de energia incluindo a evapotranspiração (ET) que pode ser utilizada como ferramenta no auxílio do manejo da irrigação em diferentes culturas, ao definir corretamente a relação ET/ET_0 ou coeficiente de cultura atual.

2.2.2 O SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving)

Antes da obtenção da estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto as imagens são processadas, com correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas para o cálculo da evapotranspiração.

Nos próximos itens são apresentados as equações com detalhamento das etapas de acordo com Teixeira (2010), Teixeira et al. (2012a, 2012b, 2013, 2014) e Franco (2014) um fluxograma do processo é ilustrado na Figura 1.

2.2.2.1 Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância

Para converter os valores quantizados e calibrados (DN) do sistema sensor LANDSAT 8 OLI para radiância e reflectância espectral, utiliza-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens. Inicialmente são

realizadas correções atmosféricas e posteriormente é realizada a conversão dos valores digitais em radiância espectral (Chander & Markham, 2003) para cada banda por meio da equação 06, sendo que a Radiância (L_λ) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica, sendo medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$).

Tabela 2.1. Descrição das bandas do Mapeador Temático (OLI) do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração para albedo e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Comprimento de onda (μm^{-1})	Coeficientes de calibração - $\omega\lambda$ ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)	Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera - E_{SUN} ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)
Band 1 – Coastal aerosol	0,43 – 0,45	-	1895,60
Band 2 – Azul	0,45 – 0,51	0,301	2004,60
Band 3 – Verde	0,53 – 0,59	0,273	1820,70
Band 4 – Vermelho	0,64 – 0,67	0,233	1549,40
Band 5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 – 0,88	0,143	951,20
Band 6 – SWIR 1	1,57 – 1,65	0,037	247,60
Band 7 – SWIR 2	2,11 – 2,29	0,013	85,50
Band 8 – Pancromática (PAN)	0,50 – 0,68	-	724,00
Band 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	-	367,00
Band 10 – Infravermelho termal (TIRS) 1	10,60 – 11,19	-	-
Band 11 – Infravermelho termal (TIRS) 2	11,50 – 12,51	-	-

Fonte: Van Hellemonst & Ruddick (2014)

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{\text{Max}} - L_{\text{Min}}}{Q_{\text{calmax}} - Q_{\text{calmin}}} \right) (Q_{\text{calmax}} - Q_{\text{calmin}}) + L_{\text{min}} \quad [6]$$

Em que:

L_λ = Radiância espectral ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)

L_{max} = radiância máxima ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)

L_{min} = radiância mínima ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)

Q_{calmin} = valor mínimo do pixel em nível de cinza (DN)

Q_{calmax} = valor maximo do pixel em nível de cinza (DN)

Q_{cal} = Valor quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (DN)

2.2.2.2 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 “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d’água, ou o solo exposto (Equação 7):

$$p_\lambda = \frac{\pi \times L_\lambda}{ESUN_\lambda \times \cos Z \times E_0} \quad [7]$$

Em que:

L_λ = radiância de cada banda

$ESUN_\lambda$ = irradiância espectral no topo da atmosfera (Tabela 2).

$\cos Z$ = ângulo zenital

E_0 = ângulo diário

Em que E_0 é definido por (Equação 8):

$$E_0 = 1,000110 + 0,0342221 \cos(da) + 0,001280(da) + 0,000719 \cos(2 \times da) + 0,000077 \sin(2 \times da) \quad [8]$$

Em que:

da = ângulo diário

Em que da é definido por (Equação 9):

$$da = (d_n - 1) \frac{2\pi}{365} \quad [9]$$

Em que:

d_n = dia Juliano da imagen

2.2.2.3 Albedo no topo da atmosfera

A obtenção do albedo no topo da atmosfera é feita pela Equação 10 abaixo:

$$\alpha_{top} = \Sigma(\omega_p \times p_\lambda) \quad [10]$$

Em que:

p_λ = reflectância

ω_λ = coeficiente de calibração para cada banda

Em que ω_λ é obtido pela equação 11:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\sum ESUN_\lambda} \quad [11]$$

2.2.2.4 Albedo de superfície

As informações sobre o albedo de superfície são obtidas pela Equação 12 utilizando os coeficientes propostos por Teixeira (2010):

$$\alpha_0 = 0,7 \times \alpha_{top} + 0,06 \quad [12]$$

Em que:

α_{top} = Albedo no topo da atmosfera, obtido na equação 10.

2.2.2.5 Temperatura de superfície

A temperatura de um corpo é estimada por meio de sensores remotos 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 elaborar a carta de temperatura da superfície, utiliza-se as imagens do infravermelho termal das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19 μm) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51 μm) do sensor TM do satélite Landsat - 8, com resolução espacial de 100 metros.

A temperatura de superfície é calculada pela Equação 13:

$$T_0 = 1,11 \times T_{bright} - 31,89 \quad [13]$$

Em que T_{bright} obtido pela Equação 14:

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_{termal} + 1}\right)} \quad [14]$$

Sendo:

L_{termal} = radiância (L_λ); média das bandas 10 e 11

2.2.2.6 Índice de vegetação de diferença normalizada-NDVI

Em seguida foram calculados os dados de NDVI pela Equação 15:

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_5)}{(\rho_4 + \rho_5)} \quad [15]$$

Sendo:

ρ_5 = reflectância da banda 5 – infravermelho próximo

ρ_4 = reflectância da banda 4 – banda no vermelho

2.2.2.7 Evapotranspiração atual em escala regional utilizando o algoritmo SAFER

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET/ET_0 (Equação 16).

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \times NDVI} \right) \right] \quad [16]$$

A implementação foi baseada em (Teixeira, 2012b), em que a e b são coeficientes de regressão, com valores de 1,90 e -0,008, respectivamente. ET_0 é a evapotranspiração de referência, dada em milímetros por dia (mm dia⁻¹), método Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Em seguida os valores instantâneos dessa relação são então multiplicados pelos valores diários da ET_0 , chegando assim à ET_c , como demonstrado na Equação 17:

$$ET_c = \frac{ET}{ET_0} \times ET_0 \quad [17]$$

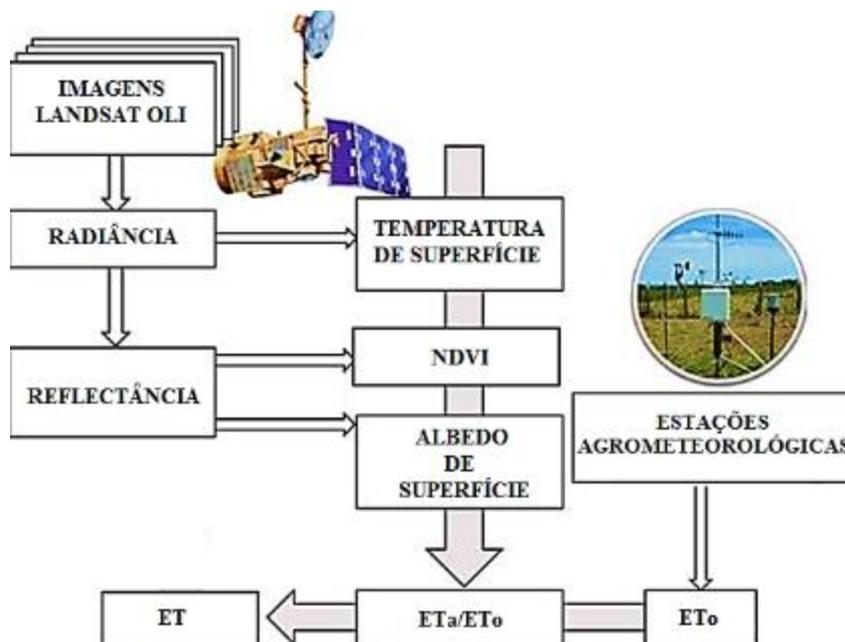


Figura 2.1. Fluxograma esquemático para o cálculo da evapotranspiração real por meio do algoritmo SAFER.

2.4 REFERÊNCIAS

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

ALLEN, R. G.; BASTIAANSEN, W. G. M.; TREZZA, R.; TASUMI M.; WATERS, R. **Surface energy balance algorithms for land** - Advance training and users manual, version 1.0, p. 98, 2002.

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

ALMEIDA, C. A. B.; ANTONINO, A. C. D.; PIMENTEL, R. M. M.; LIRA, C. A. B. O.; LIMA, J. R. S. Influência da densidade na estimativa da umidade volumétrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.5, n.1, p. 1056-1068, 2012.

ANDERSON, A. B. C. A method of determining soil-moisture content based on the variation of the electrical capacitance of soil, at a low frequency, with moisture content. **Soil Science**, Baltimore, v.56, n.2, p.29-41, 1993.

ANDERSON, A. B. C.; EDLEFSEN, N. E. The electrical capacity of the 2-electrode plaster of paris block as an indicator of soil-moisture content. **Soil Science**, Baltimore, v.54, n.2, p.35-46, 1942.

ANDRADE JÚNIOR, A.; SILVA, C.; DANIEL, R.. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2 n.4, p.303-307, 2008.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; Ma, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212-213, n.4, p. 213-229, 1998b.

BASTIAANSSEN, W.G.; KARIMI, P.; REBELO, L. M.; DUAN, Z.; SENAY, G.; MUTHUWATTE, L.; SMAKHTIN, V. Earth Observation Based Assessment of the Water Production and Water Consumption of Nile Basin Agro-Ecosystems. **Remote Sensing**, Bellingham, WA USA: SPIE, v. 6, 10306-10334, 2014.

BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J.; EVETT, S. R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n.3, p.1940-1946, 2000.

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

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

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 286p.,1998.

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

COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J.M.; HONG, S.; FRIESEN, J.; GIESEN, N.C. van de; RODRIGUES, C.; SZARZYNSKI, J.; VLEK, P.L.G. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v.33, n. 2, p.127-140, 2008.

CRUZ, T. M. L.; TEXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p. 33-45, 2010.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Water productivity of diferente land uses in watersheds assessed from satellite imagery Landsat 5 Thematic Mapper. In: NEALE, C. M. U.; MALTESE, A. (Ed.). Proc. of SPIE. Bellingham, WA USA: SPIE, 2014. v. 9239, p. 92392E-1-92392E-7.

FREITAS, W. A.; CARVALHO, J. A.; BILIBIO, C.; LACERDA, W. S. Avaliação de dispositivo, de baixo custo, para determinação de potencial matricial e umidade do solo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 38, 2009, Petrolina. **Anais...** Petrolina: CONBEA, 2009.

FREITAS, W. A. ; CARVALHO, J. A.; BRAGA, R. A. ANDRADE, M. J. B. Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.3, p. 268-274, 2012.

GIACOMONI, M. H.; MENDES, C. A. B. Estimativa da Evapotranspiração Regional por meio de Técnicas de Sensoriamento Remoto Integradas a Modelo de Balanço de Energia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 33-42, 2008.

GOWDA, P. H.; CHAVEZ, J. L.; COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; TOLK, J. A. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science**, New York, v.26, n.2, p.223-237, 2008.

GROVES S. J. L. & ROSE S. C. L. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. **Soil use and management**, Oxford v. 20, n. 1, p. 96-97, 2004.

HENG, L. K.; CAYCI, G.; KUTUK, C.; ARRILLAGA, J. L.; MOUTONNET, P. Comparison of soil moisture sensors between neutron probe, Diviner 2000 and TDR under tomato crops. In: Symposium of towards integrated soil, water and nutrient management in cropping systems: the role of nuclear techniques, 59., Bangkok, 2002. Proceedings. Bangkok: **Soil Science**, 2002.

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

LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A. I.; ANJOS, I. A.; VASCONCELLOS, A. C. M.; PINTO, L. R.; CRESTE, S. Manejo varietal em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J. C. M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 57-65.

LIMA, F. B. & SANTOS, G. O. **Balanço hídrico-espacial da cultura para o uso e ocupação atual da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Rita**, Noroeste do Estado de São Paulo. 2009. 89 f. Monografia. Fundação Educacional de Fernandópolis, Fernandópolis - SP, 2009.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87 f. Tese (Mestrado em Ciências: Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade do Estado de São Paulo, Piracicaba, 2011

MELLO, J. L. P.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. E. **Evaporação e evapotranspiração**. Viçosa: UFV. 62p., 1996

MORGAN, K. T.; PARSONS, L. R.; WHEATON, T. A.; PITTS, D. J.; OBREZA, T. A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, n.2, p.987-989, 1999.

PLATER, C. V.. A portable capacitance: Type soil moisture meter. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.80, n.1, p.391-396, 1955.

PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.1576- 1585, 1997.

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

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Barueri (SP): Manole, 1990.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, A. B.; MELO, F. B.; COELHO FILHO, M. A. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, n. 2, p. 636-640, 2007.

SOARES, R. A. B.; OLIVEIRA, P. F. M.; CARDOSO, H. R.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A.; ROSENFELD, U. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB – Açúcar, Alcool&Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, n. 4, p. 38-41. 2008.

SOUZA, C. F.;MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.63-68, 2002.

STARR, J. L.& PALTINEANU, I. C. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 47, n 1, p.43-49, 1998.

SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Amsterdam, v.6, n. 3, p.85-99, 2002.

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

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

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 2, n. 5, 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 Press: Wallingford, UK; pp. 154–157, 2012a.

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, 2012, Edinburgh. Proc. SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, XIV, v. 8531. p. 1-10, 2012b.

TEIXEIRA, A. H. C.; SHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. **Water productivity assessment by using MODIS images and agrometeorological data in the Petrolina municipality, Brazil**. Remote Sensing, Edinburgh, United Kingdom, v. 8531, p. 1-10, 2012c.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 32p. 2013a. (Documentos, 99).

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; WARREN, S. M.; BASSOI, L. H. Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatio temporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In: PETROPOULOS, G. G., (Ed.). **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**. 1. ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, v. 1, cap. 6, p. 169–191, 2014.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Publications in **Climatology**, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955.104p.

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

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

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

3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA ESTIMADA PELO MODELO SAFER EM COMPARAÇÃO COM O MÉTODO PADRÃO FAO 56 NO CERRADO

RESUMO

A quantificação da evapotranspiração é indispensável para o manejo hídrico em cultivos irrigados, pois esta representa a demanda hídrica da cultura, e seu conhecimento evita desperdícios de água e energia, e/ou quebras de produtividade. Objetivou-se estimar a evapotranspiração de cultura e seus respectivos Kc nas diferentes fases fenológicas, em áreas de cultivo sem restrição hídrica na região do Cerrado goiano, aplicando técnicas de sensoriamento remoto, para validação do modelo agrometeorológico SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) em comparação com o método padrão FAO 56. Para isto, a evapotranspiração de cultura (ET_c) e o coeficiente de cultura (Kc) foram estimados em 4 localidades nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF, e para 4 espécies vegetais diferentes (feijão, trigo, tomate e cana-de-açúcar) cultivadas em áreas irrigadas por pivô central. A ET_c foi estimada utilizando imagens do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS) e variáveis climáticas. O coeficiente de regressão “a” foi ajustado para 1,0, dessa forma, o modelo demonstrou ser bem adaptado as culturas e condições da região estudo, mostrando a facilidade de ajuste na equação, mesmo na ausência de medições da ET em campo. Em geral, os resultados da ET_c para o SAFER, concordaram bem com a metodologia de aplicação de água pelo método tradicional da FAO com valores de EQM médios em torno de $0,20 \text{ mm dia}^{-1}$ e de RMSE em torno de $0,35 \text{ mm dia}^{-1}$. O EMA referente a lâmina evapotranspirada foi em média $0,1 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto que o EPE, foi em média $0,37 \text{ mm dia}^{-1}$. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto por meio do balanço de energia e aplicação do modelo agrometeorológico SAFER, pode ser utilizada para estimar a evapotranspiração das culturas analisadas em substituição ao método padrão FAO 56 ($ET = ET_0 \cdot Kc$), na região de estudo. A ordem de grandeza dos erros na estimativa de evapotranspiração de cultura pelo SAFER é aceitável para fins de gestão dos recursos hídricos, principalmente considerando o baixo custo na obtenção da informação e a aplicação do método em larga escala.

Palavras-chave: manejo da irrigação, sensoriamento remoto, demanda hídrica, Kc

ABSTRACT

Quantification of evapotranspiration is essential for water management in irrigated crops, because this represent the crop water demand, and his knowledge avert wastes water and energy, or productivity breaks. The aim of this study was estimate the culture evapotranspiration and his respective Kc's in his phenological phases without water restriction, in areas in Goiás Cerrado region, using remote sensing techniques for validation

of the agro-meteorological model SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) in compared to the standard method FAO 56. For this, the evapotranspiration of culture (ET_c) and the crop coefficient (K_c) were estimated at four locations in the municipalities of Campo Alegre de Goiás GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO and São Sebastião-DF, and 4 different plant species (bean, wheat, tomato and sugarcane) grown in areas irrigated by center pivot. The ET_c was estimated using satellite images Landsat 8 (OLI / TIRS) and climatic variables. After the adjustment the coefficient "a" for 1.0, the model proved to be well adapted to the cultures and conditions of the study area, showing the simplicity in adjust the equation, even in the absence of ET measurements in the field. In general, results of ET_c for the SAFER, they agree well with the traditional method of FAO for the water application, with average MSE values around 0.20 mm per day and RMSE of around 0.35 mm per day. The mean absolute error, concerning the blade evapotranspired was on average 0.1 mm day⁻¹, while the standard error of estimate was on average 0.37 mm day⁻¹. The application of remote sensing techniques from the application of agro-meteorological model SAFER, can be used to estimate the evapotranspiration of the crops analyzed replacing the method standard FAO 56 ($ET_c = ET_0 \cdot K_c$) in the Cerrado region.

Key words: irrigation management, remote sensor, water requirement, crop coefficient

3.1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) compreende a transferência de água da superfície do solo ou de água livre (evaporação) e a perda de água pela vegetação controlada pelos estômatos (transpiração) (Pereira et al., 1997). A agricultura demanda grandes quantidades de água, e sendo cada vez mais preocupante a sua escassez, esforços têm sido empregados no desenvolvimento de ferramentas que possibilitem uma melhor gestão dos recursos hídricos. Neste sentido, o correto conhecimento da evapotranspiração das culturas, seja para projeto e/ou manejo de irrigação, assume fundamental importância. A validação de um modelo mais preciso para estimativa da evapotranspiração e dos coeficientes de cultura nas condições do Cerrado goiano é fundamental para estudos do uso da água em escala regional especialmente considerando a atual área irrigada, bem como a sua ampliação, e o impacto sobre a vegetação natural e bacias hidrográficas face a mudança no uso do solo e escassez de recursos hídricos.

Dentre os métodos para a estimativa da evapotranspiração (ET), as técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo estudadas por vários autores (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b, 2003a, 2003b, 2014; 2005; Allen et al., 2007; Allen et al., 2010; Elhaddad et al., 2011; Echeverria & Farias, 2012; Teixeira et al., 2010, 2012a, 2012b, 2012c, 2013a, 2013b, 2013c, 2014a, 2014b; Treza et al., 2013; Nagler et al., 2013, Franco et al., 2014, Hernandez et al., 2014). A principal vantagem da estimativa de evapotranspiração utilizando

sensoriamento remoto, em comparação aos métodos micrometeorológicos tradicionais, é que a estimativa pode ser feita exclusivamente por meio do balanço de energia, não sendo necessário se conhecer dados da cobertura vegetal (ex. coeficiente da cultura ou resistência aerodinâmica) e do teor de água no solo (ex. coeficiente de estresse hídrico ou resistência superficial) (Warren, 2013).

As estimativas de ET podem ser obtidas a partir de imagens de sensoriamento remoto, com aplicação de algoritmos aliados a modelos físicos (Andrade et al., 2014; Lopes, 2014), com destaque para o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (Bastiaanssen et al., 1998), METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*) (Allen et al., 2007) e SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) (Teixeira et al., 2013a).

O SAFER (Teixeira et al., 2012a) é um algoritmo que apresenta como vantagem o uso não obrigatório da banda termal e a possibilidade de aplicação com dados meteorológicos provenientes de diferentes tipos de estações agrometeorológicas, convencionais e automáticas, sendo uma característica importante por possibilitar a avaliação das tendências históricas dos componentes do balanço de energia, evapotranspiração e produtividade da água em larga escala ao longo dos anos, haja vista que sensores automáticos são avanços relativamente recentes na tecnologia instrumental (Teixeira et al., 2013b). No SEBAL - um método bastante aceito - o K_c é calculado, enquanto que no SAFER, a relação ET/ET_0 (coeficiente de cultura atual) é modelada e não há a necessidade de se identificar os extremos representados pelos *pixel* frio e *pixel* quente, como no SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998).

O SAFER é baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração atual em larga escala. Utiliza a correlação de alguns parâmetros calculados por sensoriamento remoto como albedo, NDVI e temperatura da superfície, com a evapotranspiração. Para o modelo tornar-se aplicável em outros ecossistemas, pode haver necessidade de se realizar ajustes nos coeficientes da equação que relaciona a fração da evapotranspiração atual à de referência, com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, visto que o modelo foi desenvolvido para a região semiárida brasileira (Teixeira et al., 2012b).

A metodologia proposta pela Food Agriculture Organization (FAO) em seu boletim n° 56 (Allen et al., 1998) é frequentemente utilizada na estimativa da ET_c, provavelmente pela sua relativa simplicidade, pois requer apenas o valor do coeficiente de

cultura K_c , e da evapotranspiração de referência (obtida por informações micrometeorológicas) (Allen et al., 1998), sendo considerada a padrão (ou de referência) na obtenção da ET_c , desde que a ET_0 seja estimada pelo modelo de Penman-Monteith e os K_c 's sejam específicos para cada sistema de cultivo.

Assim, este estudo teve por objetivo estimar a evapotranspiração de cultura e seus respectivos K_c 's nas diferentes fases fenológicas, em áreas de cultivo sem restrição hídrica na região do Cerrado goiano, aplicando técnicas de sensoriamento remoto e o balanço de energia, para validação do modelo SAFER em comparação com o método padrão FAO 56, utilizando monitoramento agrometeorológico.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Estudo foi realizado em 4 localidades do Estado de Goiás sendo (Figura 3.1), sendo Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), e para 4 espécies vegetais (feijão, trigo, tomate e cana-de-açúcar) (Figura 3.2 e Tabela 3.1) cultivadas em áreas irrigadas por pivô central.

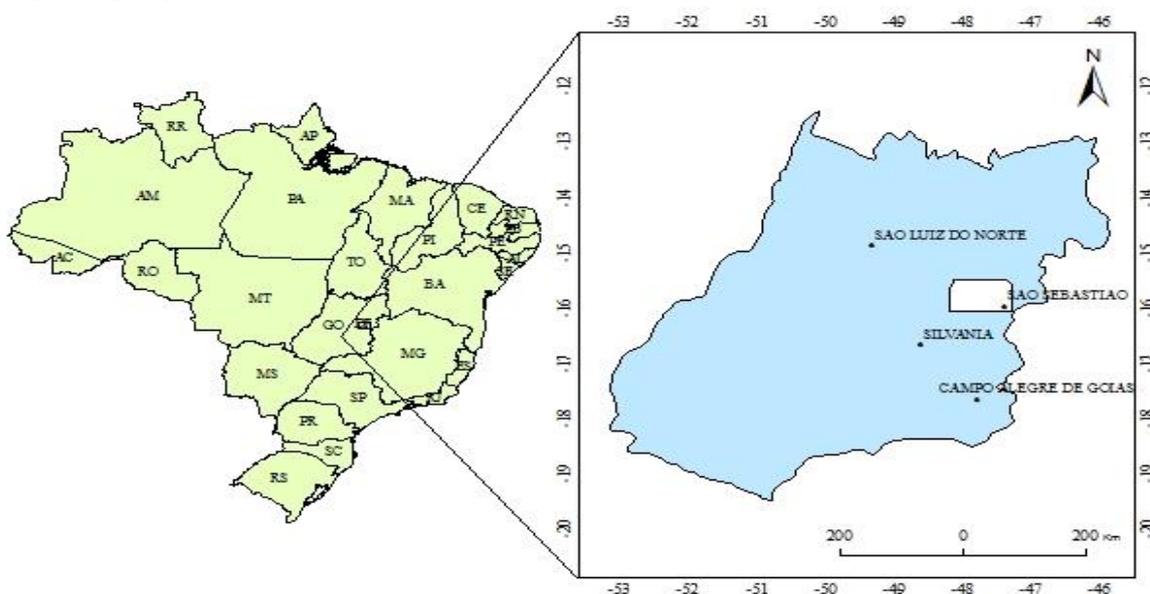


Figura 3.1 Mapa de localização da área de estudo, região de Cerrado.

O estudo foi realizado no período de estiagem (maio a setembro) para evitar interferência de nuvens nas imagens de satélite. Segundo Köppen, o clima da região é classificado como tropical Aw , sendo as chuvas concentradas no verão (outubro-abril) e período seco no inverno (maio-setembro).



3.2.1 Feijão



3.2.2 Tomate Industrial



3.2.3 Trigo



3.2.4 Cana-de-áçúcar

Figura 3.2 Localização das áreas de estudo, pivôs centrais avaliados com feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-áçúcar.

Tabela 3.1. Descrição da localização do estudo, com destaque para coordenadas geográficas, as culturas estudadas, tamanho das áreas e o período de avaliação.

Localização	Coordenadas geográficas	Órbita / ponto	Cultura (cultivar / variedade / híbrido)	Área (ha)	Período de avaliação
PAD /DF	15°56'39" S 47°28'16" W	221 / 071	Feijão / BRS Estilo	40	30/06/2015 a 02/09/2015
Silvânia	16°24'58" S 48°52'03" W	221 / 072	Tomate Industrial / H-1308 e N-901	80	08/06/2015 a 21/09/2015
Campo Alegre de Goiás	17°28'24" S 47°49'20" W	221 / 072	Trigo / BRS 394	65	30/06/2015 a 18/09/2015
São Luís do Norte	14°50'47" S 49°11'02" W	222 / 072	Cana-de-áçúcar / IAC911099 e IACSP95-5000 (1 ^a soca)	85	09/09/2014 a 27/08/2015

Para a estimativa da evapotranspiração pelo SAFER, foram selecionadas imagens sem cobertura de nuvens do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS) adquiridas gratuitamente no banco de imagens do *United States Geological Survey* – USGS (2015).

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi obtida pelo método de Penman-Monteith, utilizando dados climáticos provenientes de estações meteorológicas localizadas próximas as áreas selecionadas para o estudo.

Com base nos valores obtidos em campo para as culturas de feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar, e o acompanhamento das diferenciações fenológicas, determinou-se a duração de cada fase do desenvolvimento da cultura e o K_c correspondente a cada dia do ciclo (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Coeficiente de cultura (K_c), para cada fase de desenvolvimento das culturas avaliadas, cana-de-açúcar, feijão, tomate e trigo, em Goiás em 2014/2015.

CULTURA	Fases de desenvolvimento da cultura				
	Inicial	Desenvolvimento da cultura	Período inter-diário	Final do ciclo	Ciclo (dias)
Cana-de-açúcar*	0,55	0,9	1,05	0,8	365
Feijão seco*	0,4	0,88	1,15	0,95	120
Tomate Industrial*	0,6	0,65	0,85	0,65	120
Trigo*	0,37	0,77	1,24	0,93	115

* Allen et al. (1998) (Boletim FAO 56)

Como ferramenta de programação e cálculo utilizou-se a função *raster calculator* disponível no software gerenciador de Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permitiu o cálculo e aplicação da modelagem através de dados *raster*.

Para converter os valores quantizados e calibrados (DN) do sistema sensor LANDSAT 8 OLI para radiância e reflectância espectral, utilizou-se os coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens. Inicialmente foram realizadas correções atmosféricas e posteriormente realizou-se a conversão dos valores digitais em radiância espectral, como recomendado por Chander & Markham (2003) para cada banda por meio da Equação 1, sendo que a Radiância (L_λ) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica, sendo medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($Wm^{-2} sr^{-1}$).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{Max} - L_{Min}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{calmax} - Q_{calmin}) + L_{min} \quad [1]$$

Em que:

L_{λ} = Radiância espectral ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)

L_{max} = radiância máxima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)

L_{min} = radiância mínima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)

Q_{calmin} = valor mínimo do pixel em nível de cinza (DN)

Q_{calmax} = valor maximo do pixel em nível de cinza (DN)

Q_{cal} = Valor quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (DN)

Para cada banda foi 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 “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d’água, ou o solo exposto (Equação 2):

$$p_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} \times \cos Z \times E_0} \quad [2]$$

Em que:

L_{λ} = radiância de cada banda

$ESUN_{\lambda}$ = irradiância espectral no topo da atmosfera (Tabela 3.2).

$\cos Z$ = ângulo zenital

E_0 = correção distância terra-sol

Em que E_0 é definido por (Equação 3):

$$E_0 = 1,000110 + 0,0342221 \cos(da) + 0,001280(da) + 0,000719 \cos(2 \times da) + 0,000077 \sin(2 \times da) \quad [3]$$

Em que:

da = ângulo diário

Em que da foi definido por (Equação 4):

$$da = (d_n - 1) \frac{2\pi}{365} \quad [4]$$

Em que:

d_n = dia Juliano da imagem

A obtenção do albedo no topo da atmosfera foi feita pela Equação 5 abaixo:

$$\alpha_{top} = \Sigma(\omega_p \times p_\lambda) \quad [5]$$

Em que:

p_λ = reflectância

ω_λ = coeficiente de calibração para cada banda

Em que ω_λ foi obtido pela Equação 6:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\Sigma ESUN_\lambda} \quad [6]$$

As informações sobre o albedo de superfície foram obtidas pela Equação 7 utilizando os coeficientes propostos por Teixeira (2010):

$$\alpha_0 = 0,7 \times \alpha_{top} + 0,06 \quad [7]$$

Em que:

α_{top} = Albedo no topo da atmosfera, obtido na Equação 5.

Para elaborar a carta de temperatura da superfície utilizaram-se as imagens do infravermelho termal das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19 μm) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51 μm) do sensor TM do satélite Landsat-8, com resolução espacial de 100 metros.

A temperatura de superfície foi calculada pela Equação 8:

$$T_0 = 1,11 \times T_{bright} - 31,89 \quad [8]$$

Em que T_{bright} foi obtido pela Equação 9:

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_{termal} + 1}\right)} \quad [9]$$

Sendo:

L_{termal} = radiância (L_λ); média das bandas 10 e 11

Em seguida estimou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) pela Equação 10:

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_5)}{(\rho_4 + \rho_5)} \quad [10]$$

Sendo:

ρ_5 = reflectância da banda 5 – infravermelho próximo

ρ_4 = reflectância da banda 4 – banda no vermelho

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET/ET_0 (Equação 11).

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \times NDVI} \right) \right] \quad [11]$$

A implementação foi baseada em (Teixeira, 2012a), em que a e b são coeficientes de regressão, com valores de 1,90 e -0,008, respectivamente. ET_0 é a evapotranspiração de referência, dada em milímetros por dia (mm dia^{-1}), método Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Para aplicação do SAFER na região do estudo, o coeficiente “a” da Equação 11 foi ajustado para 1,0 considerando-se a similaridade entre os valores de coeficiente de cultura (K_c), provenientes das diretrizes da FAO, geralmente adotadas pelos produtores, e os resultados da razão ET/ET_0 modelada nas porções mais úmidas das áreas de cobertura dos pivôs para cada cultura estudada.

Em seguida os valores instantâneos dessa relação foram então multiplicados pelos valores diários da ET_0 , chegando assim à ET_c , como demonstrado na Equação 11:

$$ET_c = \frac{ET}{ET_0} \times ET_0 \quad [11]$$

A estimativa da evapotranspiração de cultura pelo método padrão FAO, foi obtida pela Equação 12:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad [12]$$

Em que:

ET_c = Evapotranspiração de cultura (mm dia^{-1})

ET_0 = Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})

O desempenho do método de estimativa de evapotranspiração pelo SAFER foi avaliado correlacionando os valores estimados pelo método padrão FAO e os valores estimados pelo SAFER a partir da média ponderada de 4 pixels selecionados na porção mais úmida de cada quadrante da área delimitada por cada um dos pivôs centrais. A metodologia adotada para comparação dos resultados foi aquela proposta por Allen & Asce (1986), a qual se fundamenta no erro padrão de estimativa (EPE) (Equação 13), a estimativa de evapotranspiração foi avaliada ainda a partir do erro quadrático médio (EQM) (Equação 14), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 15) e o erro médio absoluto (EMA) (Equação 16).

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação (r^2) (Equação 17), a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A exatidão está relacionada à aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada por um índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (Equação 18) (Willmott et al., 1985). Seus valores variam de zero (para nenhuma concordância) a 1 (para a concordância perfeita).

O desempenho do modelo também foi avaliado utilizando-se o índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), conforme a Equação 20 em que r, é o coeficiente de correlação simples de Person (Equação 19) que determina a precisão do método e indica o grau de dispersão dos pontos em relação à média, o chamado erro aleatório e d é o índice de concordância. O coeficiente c é interpretado de acordo com os referidos autores como: "ótimo" ($c > 0,85$); "muito bom" (c entre 0,76 e 0,85); "bom" (c entre 0,66 e 0,75); "mediano" (c entre 0,61 e 0,65), "sofrrível" (c entre 0,51 e 0,60), "mau" (c entre 0,41 e 0,50) e "péssimo" ($c < 0,40$).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n-1}} \quad [13]$$

$$EQM = \sqrt{\sum(O_i - E_i)^2} \quad [14]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}} \quad [15]$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum |O_i - E_i| \quad [16]$$

$$r^2 = 1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - \bar{O})^2} \quad [17]$$

$$d = 1 - \left[\frac{\Sigma(E_i - O_i)^2}{\Sigma(|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad [18]$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - \bar{O})^2}} \quad [19]$$

$$c = d \times r \quad [20]$$

Em que:

O_i = valor observado (ET_c calculada por FAO 56 Penman-Monteith), mm;

E_i = o valor estimado (ET obtida pelo SAFER), mm;

O = média dos valores observados, mm.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados referentes ao acumulado de precipitação, ET₀, ET_c e irrigação das culturas avaliadas, cana-de-açúcar, feijão, tomate e trigo, na região de estudo em 2014/2015 estão descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Acumulado de precipitação, ET₀, ET_c e irrigação das culturas avaliadas, cana-de-açúcar, feijão, tomate e trigo, na região de estudo em 2014/2015.

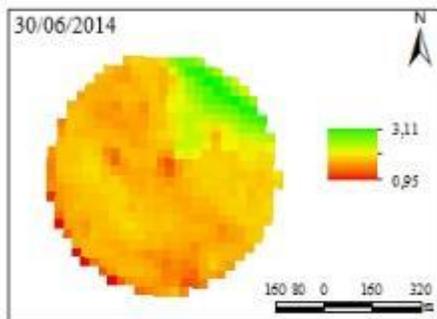
Cultura	Acum. Precipitação (mm)	Acum. ET ₀ (mm)	Acum. ET _c (mm)	Acum. Irrigação (mm)
Feijão	35,00	219,86	239,55	209,22
Tomate Industrial	31,00	456,80	337,00	399,00
Trigo	20,00	319,5	298,57	355,42
Cana-de-açúcar (1ª soca)	1171,79	1439,91	1038,35	390,00

Na Tabela 3.4 são apresentados os valores de evapotranspiração de cultura (ET_c) estimadas pelo método padrão (FAO-56), e para evapotranspiração utilizando o SAFER (ET_{SAFER}), ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar. Em média o erro absoluto foi de 0,23 mm, não sendo superior à 0,97 mm para nenhuma das culturas estudadas.

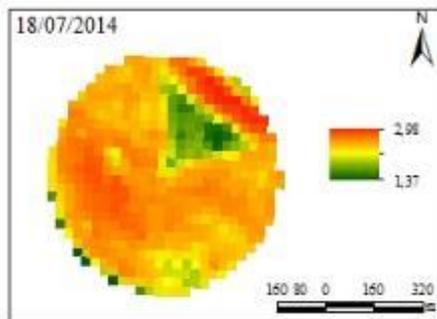
Tabela 3.4. Evapotranspiração do feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), respectivamente, 2014/2015.

Cultura	Data	Dias do ciclo	ET ₀ (mm dia ⁻¹)	ET _c (FAO) (mm dia ⁻¹)	ET _{SAFER} (mm dia ⁻¹)	Erro absoluto (mm)
Feijão	30/06/2014	40	2,22	1,95	1,69	0,26
	16/07/2014	56	2,19	2,52	2,52	0,00
	01/08/2014	73	2,77	3,19	3,21	0,02
	17/08/2014	88	3,11	3,58	3,58	0,00
	02/09/2014	105	2,99	2,81	2,63	0,18
Tomate industrial	08/06/2015	16	4,70	2,82	2,49	0,33
	24/06/2015	32	4,90	3,14	3,09	0,05
	03/07/2015	41	5,10	3,57	3,52	0,05
	10/07/2015	49	4,70	3,53	3,53	0,00
	19/07/2015	58	5,30	4,29	4,29	0,00
	26/07/2015	65	5,60	4,76	4,70	0,06
	04/08/2015	74	5,00	4,25	4,20	0,05
	11/08/2015	81	4,70	4,00	4,00	0,00
	20/08/2015	90	5,10	4,34	4,34	0,00
	05/09/2015	106	5,50	4,24	4,18	0,06
Trigo	21/09/2015	122	6,70	4,02	3,69	0,33
	30/06/2015	20	2,26	1,56	0,61	0,95
	16/07/2015	36	2,58	2,55	2,37	0,18
	01/08/2015	52	2,64	2,64	2,48	0,16
Cana-de-açúcar (1ª soca)	18/09/2015	100	4,97	1,94	1,44	0,50
	09/09/2014	8	5,41	0,41	0,30	0,11
	11/10/2014	40	5,97	1,88	1,36	0,52
	30/12/2014	120	4,56	2,28	1,87	0,41
	31/01/2015	152	6,55	3,28	2,31	0,97
	16/02/2015	168	4,21	2,13	1,65	0,48
	08/06/2015	281	3,31	1,72	1,85	0,13
	11/08/2015	345	4,59	1,56	1,05	0,51
27/08/2015	361	3,91	1,09	0,89	0,20	

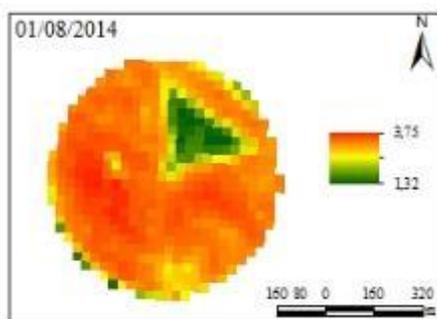
A Figura 3.3 apresenta a distribuição espacial dos valores da ET_{SAFER} (em mm dia⁻¹) para as culturas estudadas na área delimitada pelo estudo.



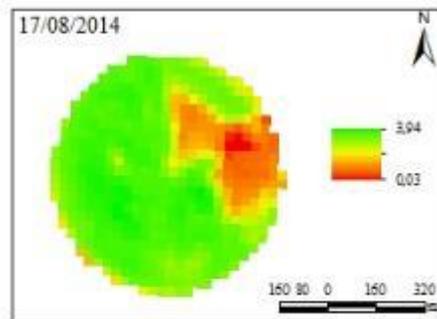
(3.3.1) Feijão



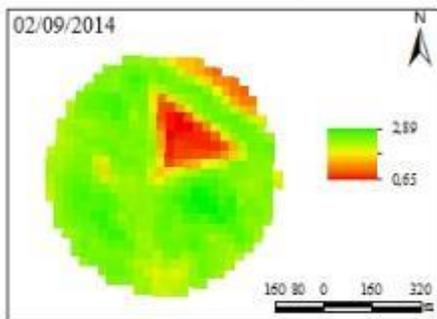
(3.3.2) Feijão



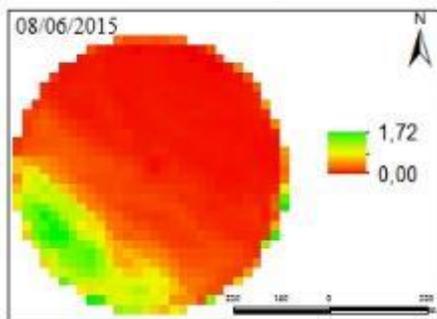
(3.3.3) Feijão



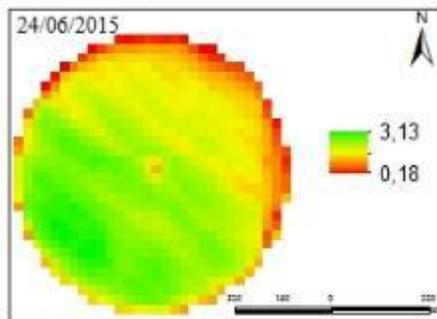
(3.3.4) Feijão



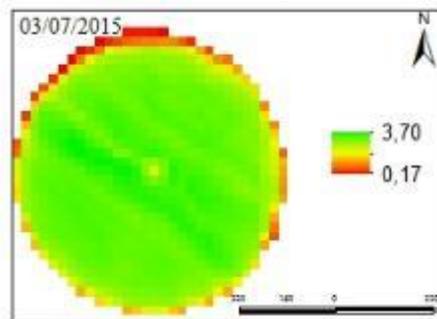
(3.3.5) Feijão



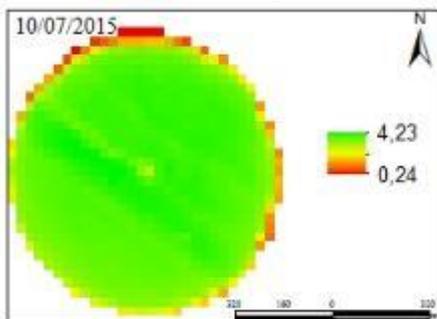
(3.3.6) Tomate Industrial



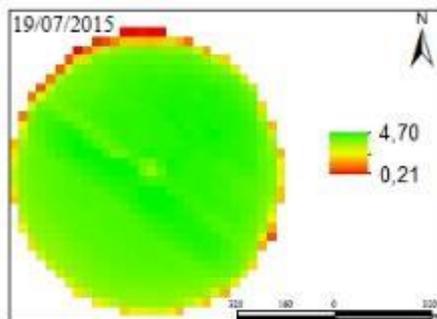
(3.3.7) Tomate Industrial



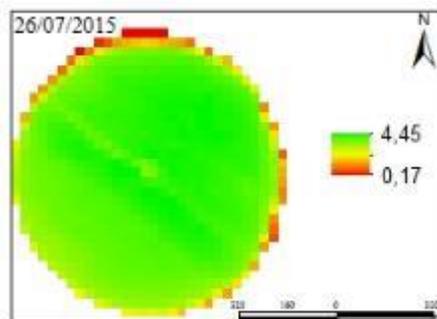
(3.3.8) Tomate Industrial



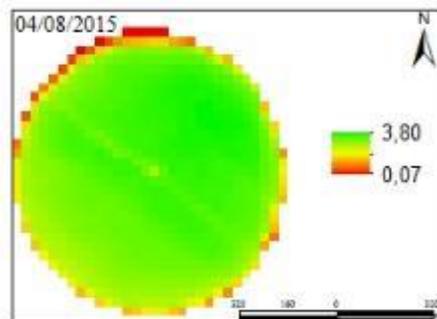
(3.3.9) Tomate Industrial



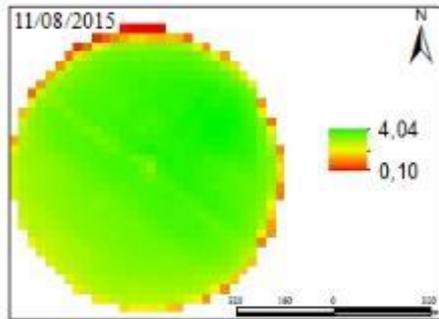
(3.3.10) Tomate Industrial



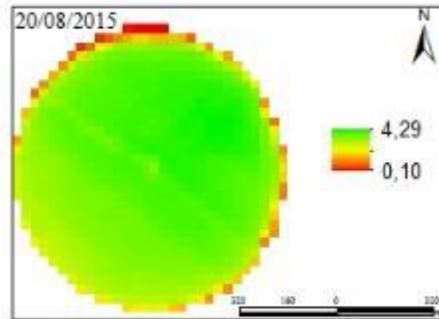
(3.3.11) Tomate Industrial



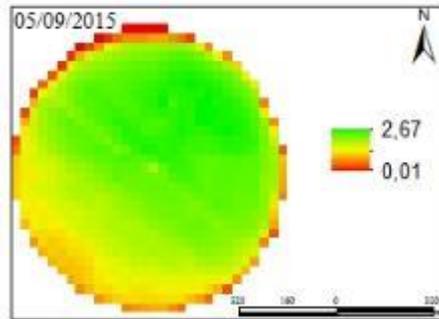
(3.3.12) Tomate Industrial



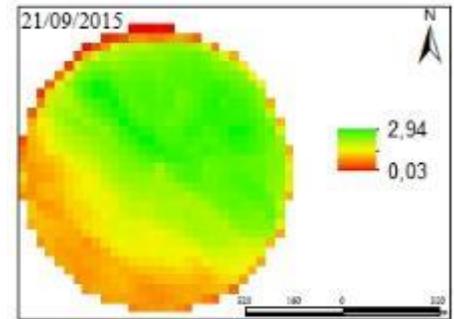
(3.3.13) Tomate Industrial



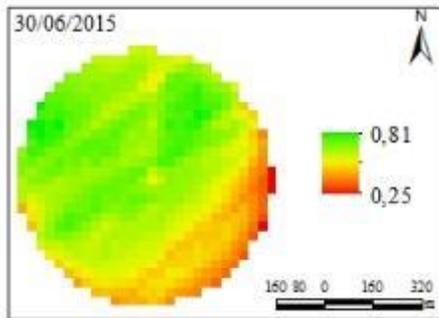
(3.3.14) Tomate Industrial



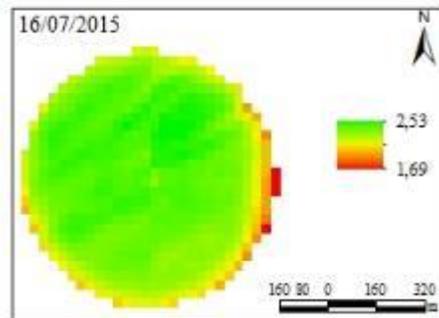
(3.3.15) Tomate Industrial



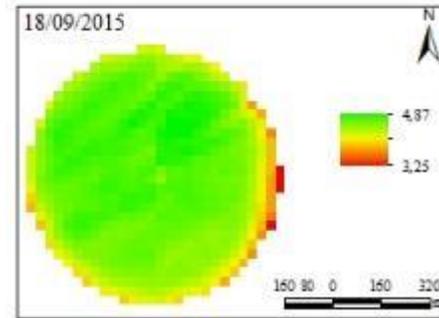
(3.3.16) Tomate Industrial



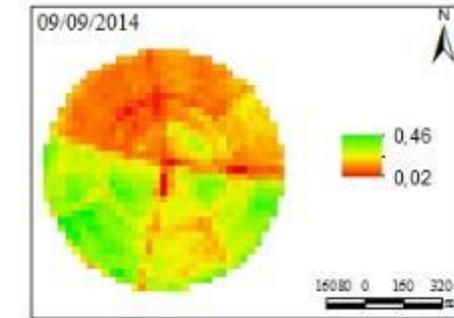
(3.3.17) Trigo



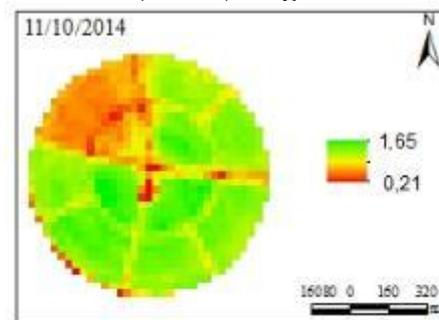
(3.3.18) Trigo



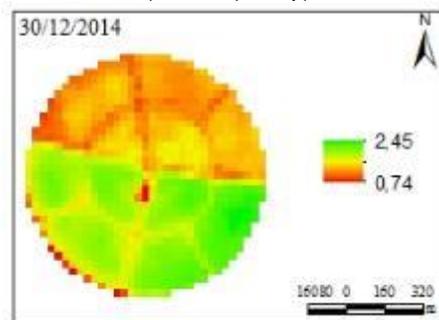
(3.3.20) Trigo



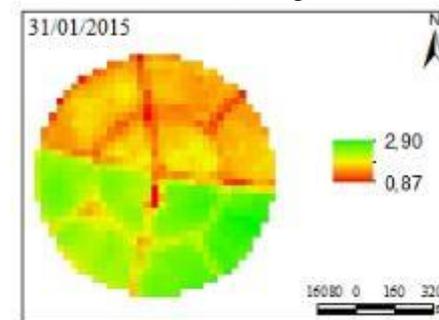
(3.3.21) Cana-de-açúcar



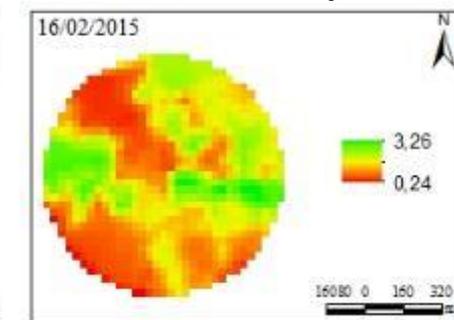
(3.3.22) Cana-de-açúcar



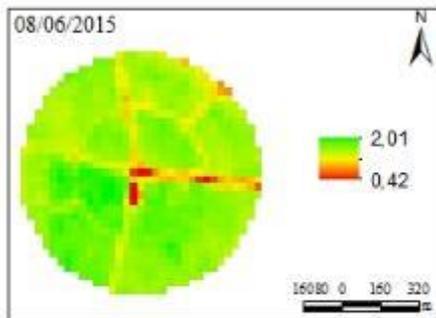
(3.3.23) Cana-de-açúcar



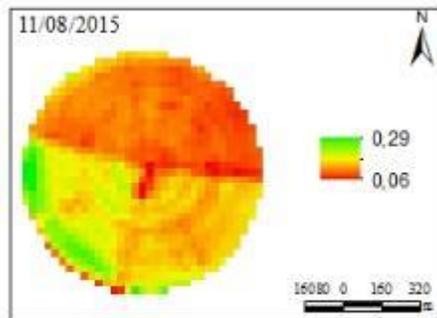
(3.3.24) Cana-de-açúcar



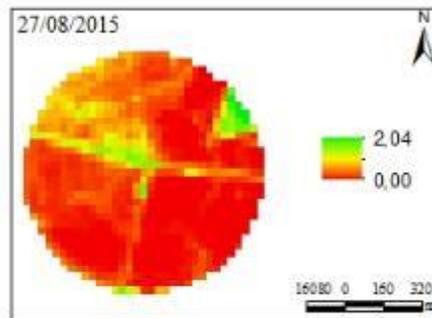
(3.3.25) Cana-de-açúcar



(3.3.26) Cana-de-açúcar

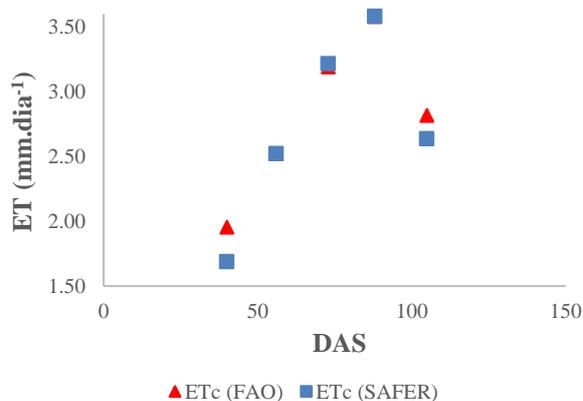


(3.3.27) Cana-de-açúcar

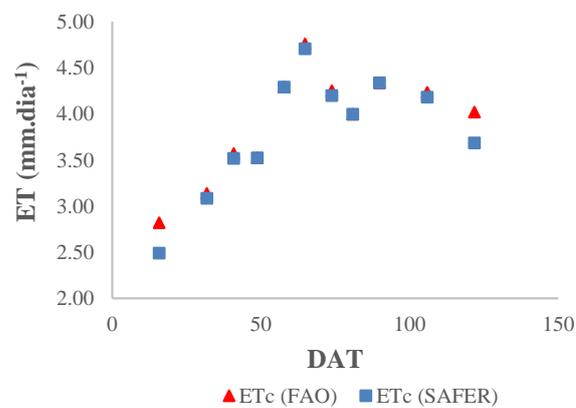


(3.3.28) Cana-de-açúcar

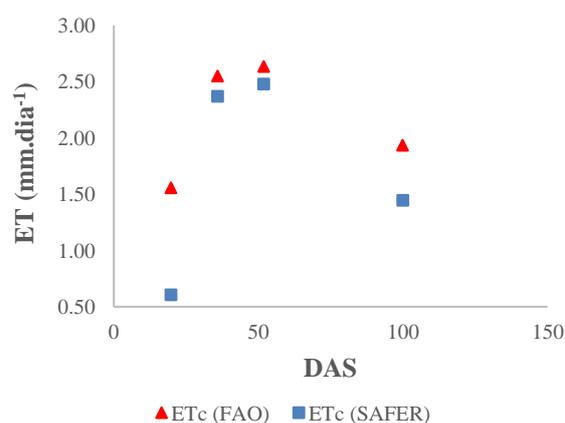
Figura 3.3. Evapotranspiração do feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar referente ao período de junho a setembro de 2014 obtida pelo SAFER nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.



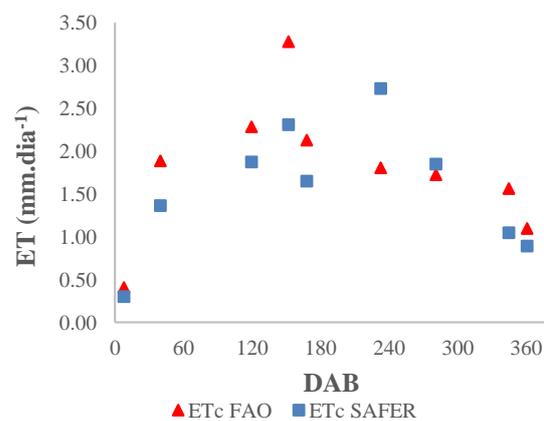
(3.4.1) Feijão



(3.4.2) Tomate industrial



(3.4.3) Trigo



(3.4.4) Cana-de-açúcar (1ª soca)

Figura 3.4. Comparativo entre a ET_c estimada pelo método padrão (FAO-56) e a ET utilizando o SAFER, em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.

Ao se analisar os dados da Tabela 3.4 e as Figuras 3.3 e 3.4, observa-se que, a ET_{SAFER} variou ao longo do ciclo fenológico dependendo do estágio de desenvolvimento das culturas, seguindo uma mesma tendência da ET_c padrão para todas as culturas estudadas. No entanto, quando se compara os valores de ET_{SAFER} , com os valores de ET_c , apesar da similaridade entre os dados, especialmente nas fases em que as culturas encontram-se em pleno desenvolvimento, no início do período de desenvolvimento, o modelo SAFER subestimou o valor, quando comparado a ET_c obtida pelo método padrão. Isto pode ser explicado, pois no período específico da semeadura ou do plantio e durante o estágio seguinte de crescimento vegetativo, a frequência de umedecimento da superfície do solo seja por chuva ou irrigação é um parâmetro que influencia o K_c na fase inicial. O tipo de preparo de solo (convencional ou plantio direto) é outro fator que pode interferir

nesse coeficiente. No caso do plantio direto, a palhada mantida sobre o solo pode reduzir a evaporação na fase inicial do ciclo da cultura e também diminuir o valor do Kc na fase inicial em até 50% (Albuquerque & Guimarães, 2011).

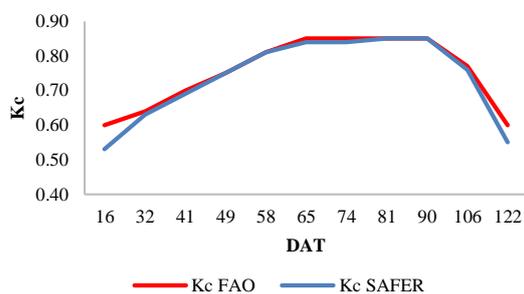
Para umedecimentos frequentes, tais como irrigação por aspersão ou chuva de alta frequência, os valores do Kc inicial podem aumentar significativamente. De outra forma, a demanda evaporativa da atmosfera, ou seja, a intensidade da ET_0 , pode afetar significativamente o Kc inicial, visto que uma maior demanda atmosférica fará com que o solo seque mais rápido entre eventos de aplicação de água devido essa superfície está descoberta ou pouco vegetada, resultando em valores menores de Kc inicial num determinado período. De acordo com Warren et al. (2013), essa dispersão dos valores na fase inicial está relacionada com a evaporação de água no solo no pivô de irrigação, apresentando forte oscilação em virtude das coincidências entre os dias de imageamento e presença/ausência de irrigação.

Outro fator que deve ser considerado é que o SAFER utiliza o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) que embora seja bastante utilizado no sensoriamento remoto, o mesmo apresenta algumas limitações como o fato deste ser altamente influenciado pelo brilho e efeito espectral do solo (Elmore et al., 2000), fato que prejudica as avaliações sobre a vegetação. Dessa forma, criou-se, o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) ou IVAS (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) desenvolvido por Huete (1988) que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, contudo como este depende do ajuste de uma constante variando de 0 a 1, segundo a própria cobertura vegetal, a sua aplicação tem sido dificultada.

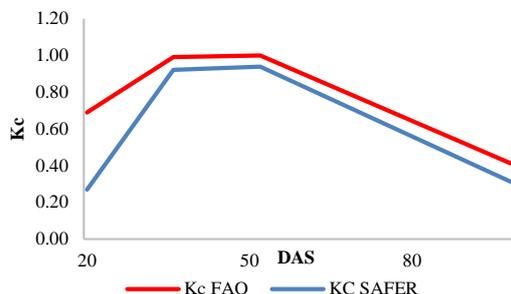
Aproximando-se da fase final do ciclo das culturas, observa-se que o modelo subestimou o valor da ET_c . Esse efeito pode ser explicado devido ao fato da cultura estar iniciando a fase final do período vegetativo, fase essa em que a planta reduz o seu vigor vegetativo, entrando na fase de senescência e iniciando o processo de maturação, fazendo-se com que os valores de NDVI diminuam até os patamares iniciais de solo exposto (Justina et al., 2013).

A Figura 3.5 ilustra a curva do coeficiente de cultura (Kc), obtido pelo modelo SAFER nas datas de passagem do satélite em relação ao método padrão. É possível analisar a diferença de coeficiente de cultura padrão e do estimado pelo modelo SAFER para o cálculo da evapotranspiração. Os Kc's dos estádios fenológicos inicial e desenvolvimento apresentam variabilidade diária com comportamento ascendente, enquanto que os Kc's correspondentes ao último estágio mostram uma variabilidade

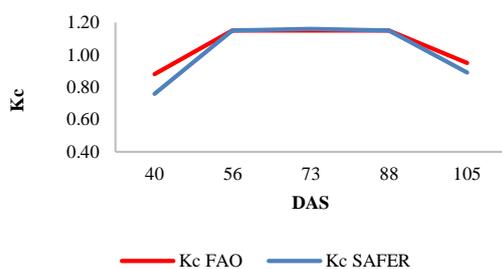
segundo uma curva descendente, conforme Allen et al. (1998). Fica reforçada ainda a boa concordância entre o SAFER e os Kc's FAO em situações em que há uma maior cobertura do solo.



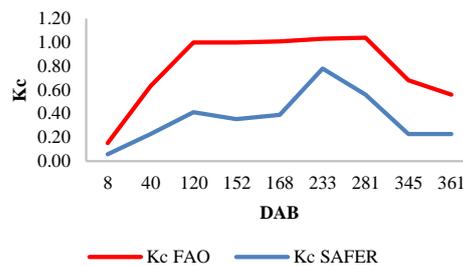
(3.5.1) Tomate Industrial



(3.5.2) Trigo



(3.5.3) Feijão

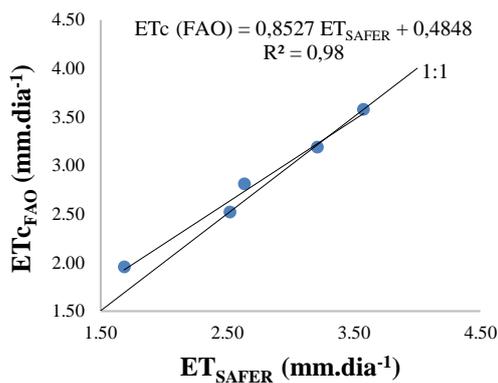


(3.5.4) Cana-de-açúcar (1ª soca)

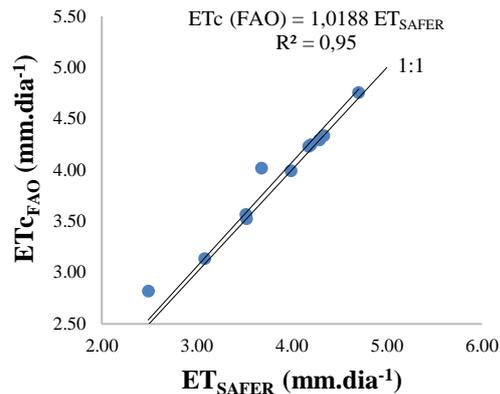
Figura 3.5. Comparativo entre o Kc (boletim FAO 56), para a cultura de tomate industrial (a), trigo (b), feijão (c) e cana-de-açúcar em 1ª soca (d) e o Kc utilizando o SAFER, em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.

Comparando valores de evapotranspiração estimados pelo modelo SAFER, aos valores de evapotranspiração da banana obtidos por um lisímetro, Oliveira et al. (2014), observaram uma grande similaridade entre os dados. Sendo que o modelo SAFER estimou valores de evapotranspiração abaixo do valores do lisímetro.

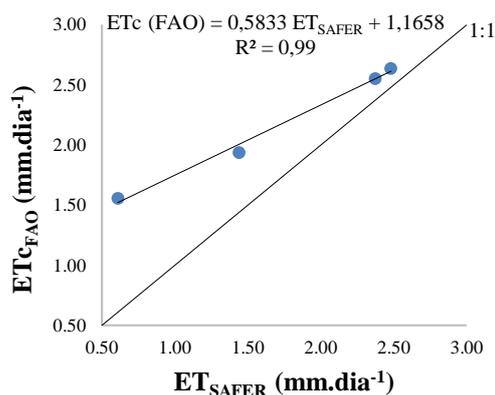
Na Figura 3.6 e Tabela 3.5 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (EQM), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de estimativa de evapotranspiração obtidas pelo padrão FAO e o SAFER para as culturas analisadas.



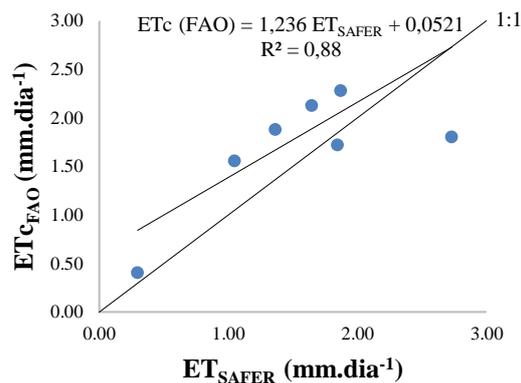
(3.6.1) Feijão



(3.6.2) Tomate industrial



(3.6.3) Trigo



(3.6.4) Cana-de-açúcar (1ª soca)

Figura 3.6. Comparativo da ET_c determinada pelo método padrão (FAO-56), e a ET_{SAFER}, em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas de feijão, tomate industrial, trigo e cana-de-açúcar (1ª soca) nos municípios de Campo Alegre de Goiás-GO, Silvânia-GO, São Luís do Norte-GO e São Sebastião-DF (Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal - PAD/DF), utilizando imagem Landsat-8.

Tabela 3.5. Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de evapotranspiração obtidas pelo padrão FAO 56 e o SAFER.

Cultura	a	b	r^2	EMA (mm dia ⁻¹)	EPE (mm dia ⁻¹)	EQM (mm dia ⁻¹)	RMSE (mm dia ⁻¹)	d	r	c	Classificação
Tomate Industrial	1,02	0,00	0,95	0,22	0,15	0,02	0,15	0,98	0,97	0,96	Ótimo
Trigo	0,58	1,17	0,99	0,11	0,63	0,47	0,69	0,85	0,99	0,84	Muito bom
Feijão	0,85	0,48	0,98	0,02	0,16	0,02	0,01	0,96	0,99	0,95	Ótimo
Cana-de-açúcar	1,24	0,05	0,88	0,05	0,53	0,31	0,56	0,72	0,94	0,68	Bom

De acordo com os resultados obtidos para a estimativa de evapotranspiração pelo SAFER, as melhores estimativas foram para as culturas de tomate industrial ($c = 0,96$; $d = 0,98$; $EPE = 0,15$, $EMA = 0,22$) e feijão ($c = 0,95$; $d = 0,96$; $EPE = 0,16$, $EMA = 0,02$) ambas com desempenho “ótimo”, ou seja, com índices de concordância próximos da unidade, caracterizando uma concordância quase perfeita. Apresentaram boa precisão ($r = 0,97$) para o tomate industrial e ($r = 0,99$) para o feijão. Com desempenho “muito bom” ficou a estimativa de evapotranspiração para a cultura do trigo ($c = 0,84$; $d = 0,85$; $EPE = 0,63$, $EMA = 0,11$). A estimativa de evapotranspiração para a cana-de-açúcar apresentou o pior índice de desempenho, ainda assim sendo classificado como “bom” ($c = 0,68$; $d = 0,72$; $EPE = 0,53$, $EMA = 0,05$).

Em geral, os resultados da ET_c para o SAFER, concordou bem com a metodologia de aplicação de água pelo método tradicional da FAO com valores de EQM médios em torno de $0,20 \text{ mm dia}^{-1}$ e de RMSE em torno de $0,35 \text{ mm dia}^{-1}$. O EMA referente a lâmina evapotranspirada foi em média $0,1 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto que o EPE, foi em média $0,37 \text{ mm dia}^{-1}$. A ordem de grandeza dos erros na estimativa de evapotranspiração de cultura pelo SAFER é aceitável para fins de gestão dos recursos hídricos, principalmente considerando o baixo custo na obtenção da informação e a aplicação do método em larga escala.

Destaca-se, também, que as equações de regressão obtidas para cada cultura apresentaram valores dos coeficientes a e b próximo a zero e um, respectivamente, evidenciando um bom desempenho (Figura 3.6). A correlação de Pearson “ r ” apresentou para tomate industrial, trigo, feijão e cana-de-açúcar valores de $r = 0,97$; $0,99$; $0,99$; $0,94$ respectivamente muito próximos de um, o que de acordo com Hoppinks (2000) pode ser considerada quase perfeita, enquanto que para o r^2 apresentou valores de $r^2 = 0,99$, $0,98$ e $0,95$ para trigo, feijão e tomate industrial respectivamente indicando uma forte relação entre as duas variáveis analisadas. O r^2 para a estimativa na cultura da cana-de-açúcar apresentou o pior desempenho sendo igual a $0,88$.

Conforme os resultados apresentados, a utilização do coeficiente “ a ” como $1,0$, na equação do SAFER, demonstrou ser bem adaptado as culturas e condições da região estudo, mostrando a facilidade de ajuste na equação, mesmo na ausência de medições da ET em campo. Em geral, os resultados da ET_c para o SAFER, concordaram bem com a metodologia de aplicação de água pelo método tradicional da FAO.

As precisões alcançadas pelas estimativas de evapotranspiração obtidas pelo SAFER (Teixeira et al., 2013a Hernandez et al., 2014) são semelhantes e comparáveis aos desempenhos alcançados por algoritmos que utilizam técnicas de sensoriamento remoto e que são constituídos de metodologias de processamento bastante complexas a exemplo do SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) e METRIC (Allen et al., 2007). A partir dos resultados obtidos, o modelo SAFER mostrou-se consistente na avaliação do consumo de água e na observação da variabilidade espacial do consumo de água em talhões ou áreas que deveriam ser agronomicamente homogêneas.

A dependência de dados de imagens de satélites representa uma limitação relevante na aplicação de modelos de estimativa de evapotranspiração uma vez que somente imagens livres da presença de nuvens podem ser utilizadas. Outro fator a ser considerado é a escala temporal de aquisição dessas imagens, visto que para o Landsat 8 essa escala de obtenção de imagens é de 16 dias. Outro desafio para modelos que usam imagens de satélites para a obtenção da ET tornarem-se aplicáveis é a instalação de estações agrometeorológicas para a união de dados climáticos e parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, seguida de testes em ecossistemas diversos.

A construção de séries temporais de evapotranspiração em larga escala e média resolução espacial pode ser uma ferramenta auxiliar qualitativa no trabalho de fiscalização de recursos hídricos, como o cotejo com outorgas de uso d'água, no qual áreas irrigadas com altos valores de evapotranspiração obtidos remotamente podem ser selecionados visando a fiscalização *in-loco*. Neste caso, as estimativas de evapotranspiração são utilizadas como indicativos indiretos do uso da água (Warren et al., 2014).

Em se tratando de estimativas quantitativas de lâminas irrigadas esta é mais complexa, pois nem toda lâmina de água aplicada na irrigação é evaporada. Nesse caso deve-se proceder o balanço hídrico do solo. Outras possibilidades incluem ainda o balanço hídrico em bacias hidrográficas, monitoramento de estiagens e modelos de previsão de safra. As estimativas de evapotranspiração podem ser utilizadas ainda na obtenção remota de outras variáveis hidrológicas, tais como o teor de água na zona radicular, lâmina d'água irrigadas, déficit hídrico, com importantes aplicações na gestão de recursos hídricos.

3.4 CONCLUSÃO

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto por meio do balanço de energia e aplicação do modelo agrometeorológico SAFER, pode ser utilizada para estimar a evapotranspiração de cultura, para feijão, trigo, tomate industrial e cana-de-açúcar, em substituição ao método padrão FAO 56 ($ET_c=ET_0.Kc$), na região de estudo. A ordem de grandeza dos erros na estimativa de evapotranspiração de cultura pelo SAFER é aceitável para fins de gestão dos recursos hídricos, principalmente considerando o baixo custo na obtenção da informação e a aplicação do método em larga escala.

3.5 REFERÊNCIAS

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

ALLEN, R. G. A.; ASCE, M. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, St. Joseph, v.112, n.4, p.348-386, 1986.

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

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; KJAERGAARD, J. Mapping evapotranspiration at high resolution, application manual for Landsat satellite imagery. Version 2.0.7. Kimberly: University of Idaho. 2010, p.248.

ALBUQUERQUE, P. E. P. & GUIMARÃES, D. P. Gestão da água na agricultura: coeficientes de cultivo (Kc) e de tanque classe A (Kp): um exemplo metodológico de estimativa do Kc da cultura do milho e do Kp para o Estado de Minas Gerais. Brasília, v. 63, n.2, p. 12-19, 2011.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212, n.1, p. 198-212, 1998a.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; Ma, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212-213, n.4, p. 213-229, 1998b.

BASTIAANSEN, W. G., ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 94, n. 4, p. 321-340, 2003a.

BASTIAANSEN, W. G., CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 58, n.4 p. 171-192, 2003b.

BASTIAANSEN, W. G., NOORDMAN, E. J., PELGRUM, H., DAVIDS, G., THORESON, B. P., ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 131, n. 2 p. 85-93, 2005.

BASTIAANSEN, W. G.; KARIMI, P.; REBELO, L. M.; DUAN, Z.; SENAY, G.; MUTHUWATTE, L.; SMAKHTIN, V. Earth Observation Based Assessment of the Water Production and Water Consumption of Nile Basin Agro-Ecosystems. **Remote Sensing**, Bellingham, WA USA: SPIE, v. 6, 10306-10334, 2014.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

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

ELMORE, A. J.; MUSTARD, J. F.; MANNING, S. J.; LOBELL, D. B. Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 73, n.1, p.87-102, 2000.

ECHEVERRIA, C. P., FARIAS, S. O. Calibration and validation of a remote sensing algorithm to estimate energy balance components and daily actual evapotranspiration over a drip-irrigated Merlot vineyard. **Irrigation Science**, New York, v. 30, n. 4, p. 537-553, 2012.

ELHADDAD, A., GARCIA, L. A.; CHÁVEZ, J. L. Using a Surface Energy Balance Model to Calculate Spatially Distributed Actual Evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 137, n. 1, 2011.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Water productivity of diferente land uses in watersheds assessed from satellite imagery Landsat 5 Thematic Mapper. In: NEALE, C. M. U.; MALTESE, A. (Ed.). **Remote Sensing**. Bellingham, WA USA: SPIE, 2014. v. 9239, p. 92392E-1-92392E-7.

HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C; NEALE, C. M. U.; TAGHVAEIAN, S. large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the northwest of Sao Paulo State, Brazil. Vii International Symposium On Irrigation Of Horticultural Crops. Leuven 1: Int Soc **Horticultural Science**, v. 1038, n. 3, p. 263-270, 2014.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI), **Remote Sensing of Enviroment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

JUSTINA, D. D. D.; LIMA, P. H. P.; SOUSA, C. H. W.; OLDONI, L. V.; JOHANN, J. A.; MERCANTE, E. Geração de perfis espectro-temporais de NDVI para diferentes cultivares de soja. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, 2013, **Anais...**p. 8838-8844, 2013. CD-ROM

NAGLER, P; GLENN, E. P.; NGUYEN, U.; SCOTT, R. L.; DOODY, T. Estimating Riparian and Agricultural Actual Evapotranspiration by Reference evapotranspiration and MODIS Enhanced Vegetation Index. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 5, n. 5, p. 3849-3871, 2013.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 2, n. 5, 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 Press: Wallingford, UK; pp. 154–157, 2012 a.

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, 2012, Edinburgh. Proc. SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, XIV, v. 8531. p. 1-10, 2012b.

TEIXEIRA, A. H. C.; SHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. **Water productivity assessment by using MODIS images and agrometeorological data in the Petrolina municipality, Brazil**. Remote Sensing, Edinburgh, United Kingdom, v. 8531, p. 1-10, 2012c.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 32p. 2013a. (Documentos, 99).

TEIXEIRA, A. H. C.; WARREN, S. M.; LOPES, H. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; NEALE, C. M. U. Large-scale water productivity assessments with modis imagens in changing semi-arid environment: A Brazilian case study. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 5, n. 11, p. 5783 – 5804, 2013b.

TEIXEIRA, A. H. C.; LOPES, H. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; WARREN, S. M.; ANDRADE, R. G.; NEALE, C. M. U. Retrieving water productivity parameters by using Landsat images in the Nilo Coelho irrigation scheme, Brazil. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. SPIE **Remote Sensing**. [S.l.], Bellingham WA, USA, v. 6, n. 12, p. 888713–888713, 2013c.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; WARREN, S. M.; BASSOI, L. H. Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatio temporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In: PETROPOULOS, G.

G., (Ed.). **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**. 1. ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, v. 1, cap. 6, p. 169–191, 2014a.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. In: NEALE, C. M. U.; MALTESE, A. (Ed.). **Proceedings Of SPIE**. Bellingham, WA USA: SPIE, v. 9239, p. 92390O–1–92390O–10, 2014b.

TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; TASUMI, M. Estimation of Actual Evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico Using MODIS and Landsat Imagery with the METRIC Model. **Remote Sensing**. Bellingham, WA USA, v. 5, n. 12, 5, p. 5397-5423, 2013.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat Project Description. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php> Acesso em julho de 2015.

WARREN, M. S. Desagregação espacial de estimativas de evapotranspiração real obtidas a partir do sensor MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Porto Alegre, v. 28, n. 2, p. 153-162, 2013.

WARREEN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 07, n. 1, p. 065-082, 2014.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n.C5, p.8995-9005, 1985.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO SAFER NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-ÁÇUCAR, EM CULTIVO DE SEQUEIRO

RESUMO

A cana-de-açúcar está entre as culturas agrícolas com maior área irrigada no Brasil. Assim, conhecer a necessidade hídrica desta cultura é de fundamental importância para se fazer gestão dos recursos hídricos, dimensionamento de projetos de irrigação, manejo da água na lavoura e estimativa de produtividade. Neste contexto, métodos que possam determinar o balanço hídrico de culturas a partir de imagens de satélites se mostram muito úteis, pois são capazes de propiciar a sua determinação em áreas com grande heterogeneidade e dimensão. Objetivou-se nesse estudo realizar um comparativo entre o método de estimativa de ET_r obtida pelo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*), com o balanço hídrico climatológico e o balanço de água no solo de forma a validar a metodologia proposta como uma alternativa aos métodos tradicionais. O estudo foi realizado no município de Santo Antônio de Goiás - GO em área de 100 ha, cultivados com cana-de-açúcar (variedade CTC-4) em sequeiro. A ET_r foi estimada utilizando imagens do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS) e os resultados comparados com o balanço hídrico do solo e climático no período de maio a agosto de 2015. Em geral, os resultados da estimativa da ET_r pelo SAFER, concordaram bem com os métodos tradicionais, estimando valores de ET_r em média $0,70 \text{ mm dia}^{-1}$ acima dos valores de estimativa obtidos com o balanço hídrico do solo e de $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$ para o balanço hídrico climatológico. A estimativa de evapotranspiração utilizando o sensoriamento remoto e o modelo agrometeorológico SAFER pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar na região de estudo, utilizando o ajuste $ET_r = 0,87 * ET_{SAFER} - 0,51$ para o balanço hídrico do solo e o ajuste $ET_r = 0,92 * ET_{SAFER} - 0,36$ para o balanço hídrico climático.

Palavras-chave: déficit hídrico, necessidade hídrica, sensoriamento remoto, *Saccharum officinarum L*

ABSTRACT

The sugarcane is the crop with largest irrigated area in Brazil. So, meet the water requirement of the crop is of fundamental importance to management of water resources, projects of irrigation, water management in agriculture and productivity estimate. In this context, methods that can determine the water balance of cultures from satellite images show themselves very useful because are able to provide their determination in areas with high heterogeneity and size. The aim of this study was making a comparison between the ET_r estimation method obtained by the SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*), with the climatological hidric balance and the soil water balance in order to validate the proposed methodology as an alternative to methods traditional. The study was conducted in Santo Antônio de Goiás - GO in an area of 100 hectares, planted with sugarcane (CTC-4 variety) in dryland. The ET_r was estimated using satellite images Landsat 8 (OLI /

TIRS) and the results compared with the soil water balance and climate in the period May-August 2015. In general, the results estimated by the SAFER agreed well with traditional methods, estimating ETr on average 0.70 mm dia-1 above estimation values obtained with the soil water balance and 0.48 mm day-1 for the climatic water balance. The evapotranspiration estimation method using remote sensing and the agro-meteorological model SAFER can be used to estimate actual evapotranspiration (ETr) of sugarcane in the Cerrado region, using the adjustment $ETr = 0.87 * ETSAFER - 0.51$ for the soil water balance and the adjustment $ETr = 0.92 * SAFER - 0.36$ for the climatological hydric balance.

Key words: water stress, water requirement, remote sensor, *Saccharum officinarum* L

4.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente o país com a maior produção de cana-de-açúcar do mundo, com 23% da produção mundial. A produção de cana-de-açúcar na safra 2015/2016 deve totalizar 655,20 milhões de toneladas sendo que a área colhida destinada ao setor sucroalcooleiro no país está estimada em 8.954 milhões de ha. A produção brasileira concentra-se no Estado de São Paulo (maior produtor), (51,87%), seguido por Goiás com (10,10%) e Minas Gerais (8,00%) (Conab, 2016).

A disponibilidade de água para a cana-de-açúcar pode ser considerada como o principal causador da variabilidade de produtividade, ciclo após ciclo da cultura. Assim, acredita-se que o déficit hídrico seja um dos fatores limitantes para o aumento da produtividade na região do Cerrado, causado pelos mais de cinco meses de estiagem por ano (maio a setembro), tendo como consequência uma baixa produtividade média, cerca de 70 t ha⁻¹ (Conab, 2013), muito abaixo de outras importantes regiões produtoras brasileiras.

Há efetivamente uma relação linear entre a evapotranspiração da cana-de-açúcar e sua produtividade (Dalri, 2006). Os danos causados pelo estresse hídrico no crescimento foliar e produtividade da cana-de-açúcar dependem da intensidade e da duração do período de deficiência, da fase de desenvolvimento da cultura em que ocorre, e da variedade cultivada (Soares et al., 2008).

A cana-de-açúcar está entre as culturas agrícolas com maior área irrigada no Brasil, dos 5,4 milhões de hectares irrigados no país, 1,7 milhões são com a cultura da cana (Cristofidis et al., 2010). Assim, conhecer a necessidade hídrica desta cultura é de fundamental importância para se fazer gestão dos recursos hídricos, dimensionamento de projetos de irrigação, manejo da água na lavoura e estimativa de produtividade. Dentre os

vários métodos de se obter a necessidade hídrica das plantas, destaca-se o método do balanço hídrico da cultura no campo.

De acordo com Silva et al. (2014), o balanço hídrico num ambiente vegetado é a contabilização das entradas e saídas de água num dado volume de solo, durante certo período de tempo. Como limite superior desse volume a superfície do solo e como limite inferior a profundidade do sistema radicular da vegetação de interesse, podendo ser verificado déficit ou excesso de água no local considerado, com variações intra e interanuais.

Outro método utilizado para estimativa da evapotranspiração baseia-se na equação do balanço de energia à superfície e em técnicas de sensoriamento remoto (Bastiaanssen et al., 1998, 2003a, 2003b, 2014; 2005; Allen et al., 2007; Allen et al., 2010; Elhaddad et al., 2011; Echeverria & Farias, 2012; Teixeira et al., 2010, 2012a, 2012b, 2012c, 2013a, 2013b, 2013c, 2014a, 2014b; Treza et al., 2013; Nagler et al., 2013, Franco et al., 2014, Hernandez et al., 2014). Bezerra (2008) cita que os dados obtidos através do sensoriamento remoto, para o cálculo dos fluxos de energia que ocorrem na interface solo-vegetação-atmosfera, utilizam-se de algoritmos para a obtenção desses elementos. Um desses algoritmos é o SAFER (Simple algorithm for evapotranspiration retrieving) que foi desenvolvido por Teixeira (2010).

O SAFER (Teixeira et al., 2012b) utiliza a correlação de alguns parâmetros calculados por sensoriamento remoto como albedo, NDVI e temperatura da superfície, com a evapotranspiração. A principal vantagem da estimativa de evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto, em detrimento de outras perspectivas, como as que se baseiam na equação de Penman-Monteith, é que sua estimativa pode ser obtida exclusivamente por meio da equação de balanço de energia, não sendo necessário se conhecer dados da cobertura vegetal (ex. coeficiente da cultura ou resistência aerodinâmica) e do teor de água no solo (ex. coeficiente de estresse hídrico ou resistência superficial) (Warren, 2012).

Neste contexto, métodos que possam determinar o balanço hídrico de culturas a partir de imagens de satélites se mostram muito úteis, pois são capazes de propiciar a sua determinação em áreas com grande heterogeneidade e dimensão, ao contrário de métodos micrometeorológicos, como o das correlações turbulentas e da razão de Bowen, e mesmo o de medidas diretas com lisímetros. Esses métodos, apesar de precisos, apresentam resultados válidos para áreas com culturas com as mesmas condições fenológicas, hídricas, de configuração de plantio e, quando irrigadas, sujeitas a um mesmo sistema de irrigação.

Diversos autores estudaram a obtenção da evapotranspiração real (ET_r) em culturas utilizando sensoriamento remoto, contudo, a ET_r diária obtida foi comparada apenas com o método padrão da FAO (Allen et al, 1998) a partir de dados oriundos de estações meteorológicas. Dessa forma o que se propôs nesse estudo foi realizar um comparativo entre o método de estimativa de ET_r obtida pelo SAFER, com o balanço hídrico climatológico e o balanço de água no solo de forma a validar a metodologia proposta como uma alternativa aos métodos tradicionais.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Santo Antônio de Goiás - GO ($16^{\circ} 29' S$; $49^{\circ} 18' W$; 780 m) (Figura 4.1 e 4.2) em área de aproximadamente 100 ha, pertencente a destilaria Centro Álcool S.A, cultivados com cana-de-açúcar (variedade CTC-4), em estágio de 1ª soca (2ª Colheita), sendo o plantio realizado em abril/2013, em sistema mecanizado, com mudas pré-brotadas e espaçamento de 1,5 m entre fileiras e o primeiro corte em setembro de 2014.

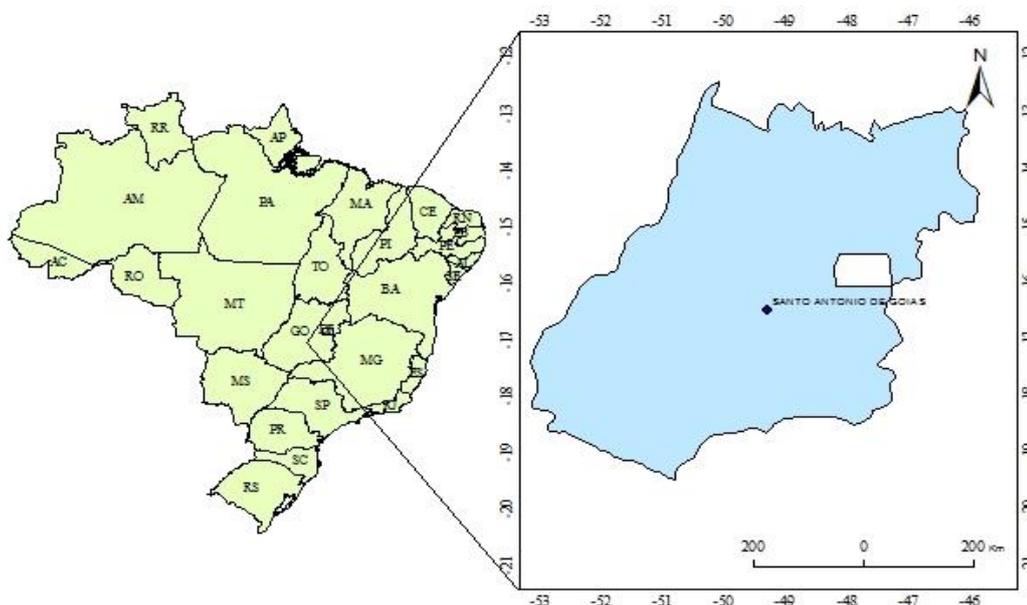


Figura 4.1. Localização da área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, ($16^{\circ} 29' S$; $49^{\circ} 18' W$; 780 m).

Segundo a classificação de Köppen, o município de Santo Antônio de Goiás, GO apresenta clima Aw, tropical de savana, megatérmico. A temperatura média anual do ar é de $23,0^{\circ} C$ e o mês de junho apresenta a menor média de temperatura mínima do ar ($14,4^{\circ} C$),

enquanto o mês de setembro apresenta a maior média de temperatura máxima do ar (31,7 °C). O regime pluvial é bem definido, ou seja, período chuvoso de outubro a abril e período seco de maio a setembro. A precipitação pluvial média anual é de 1.498 mm, e a umidade relativa do ar, média anual, é de 70%, com o mês de agosto apresentando o menor índice (47%). A perda de água para a atmosfera, média anual, estimada pelo método de Penman Montheith é da ordem de 1.559 mm.



Figura 4.2. Área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, (16° 29' S; 49° 18' W; 780 m).

O solo predominante é o Latossolo Vermelho-distrófico, textura franco-argilo-arenosa, fase cerradão subperenifólio, relevo plano. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas profundidades de 0,0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m, com cinco repetições. Nas amostras deformadas foram determinadas a composição granulométrica do solo e teor de matéria orgânica. Nas amostras indeformadas determinou-

se a densidade do solo, utilizando-se o amostrador de Uhland, com anéis de inox com 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, conforme Embrapa (1997). A porosidade total foi obtida pela relação entre densidade do solo e densidade de partículas. A Tabela 4.1 apresenta os dados de classificação textural, teor de argila, areia, silte e matéria orgânica na área onde o estudo foi conduzido.

Tabela 4.1. Classificação textural, teor de argila, areia, silte e matéria orgânica na área de estudo.

Profundidade (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	MO (%)	Classificação Textural
0,20	31	13	56	2,0	Franco argilo arenoso
0,40	27	13	60	1,0	Franco argilo arenoso
0,60	29	18	53	1,0	Franco argilo arenoso
0,80	28	17	54	1,0	Franco argilo arenoso

Papakyriakou & McCaughey (1991) observaram que a probabilidade de erros na estimativa da evapotranspiração pelo método do balanço hídrico é menor para períodos com pouca precipitação e alta taxa evaporativa. Dessa forma, com o intuito de se obter uma maior precisão na obtenção da ET_r , e a necessidade de se obter imagens livre da presença de nuvens para aplicação do balanço de energia por sensoriamento remoto para validação do método, o balanço hídrico do solo foi realizado no período de maio a agosto de 2015, totalizando 105 dias, o qual foi dividido em 7 subperíodos, referentes a passagem do satélite Landsat 8 com total aproveitamento das imagens, considerando como subperíodo o dia anterior e o da passagem do satélite.

O balanço hídrico em determinado volume de solo e pela lei de conservação das massas, num certo período de tempo (Libardi, 2005), é descrito pela Equação 1:

$$P + I \pm Q \pm R \pm \Delta ARM - ET = 0 \quad [1]$$

Sendo P – precipitação pluvial (mm); I – irrigação (mm); Q – fluxo subsuperficial (mm); podendo ser ascendente (+) ou descendente (-) na base limite inferior do volume de controle; R – escoamento superficial (mm); ΔARM – variação de armazenamento de água no perfil de solo (mm); ET – evapotranspiração (mm).

Esta equação, porém, é usualmente rearranjada para deixar a evapotranspiração (ET, mm) como variável dependente (Equação 2):

$$ET = \Delta ARM - (P \pm Q \pm R) \quad [2]$$

O termo irrigação foi nulo, pois o trabalho foi realizado em condições de sequeiro. Considerou-se que não houve escoamento superficial de água, devido ao solo apresentar topografia plana e ser naturalmente bem drenado. Para registro da precipitação, foram instalados 5 pluviômetros de balsa modelo ECRN 5 da Decagon Devices (Figura 4.3.1), a 2,0 m de altura. Estes pluviômetros possuem uma área de captação de 50 cm² e uma balsa de 5 cm³, com 1 mm de resolução. Cada bateria de sensores modelo EC-5 (Figura 4.3.3 e 4.3.3) da Decagon Devices e o pluviômetro foram conectados a um datalogger EM-50 ((Figura 4.3.4) da Decagon Devices, sendo as leituras realizadas e armazenadas a cada hora.



Figura 4.3. Conjunto de sensores EC-5, Pluviômetro ECRN-50 e datalogger EM50.

A variação no armazenamento de água no solo foi calculado pela regra 3/8 de Simpson, considerando-se que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$) (Libardi, 2005), a partir da Equação 3:

$$ARM = \int_0^l \theta(Z) dZ = \frac{Z}{3} (\theta_0 + 4\theta_1 + \theta_2) \quad [3]$$

Sendo θ o conteúdo de água do solo, obtido com os sensores tipo FDR.

A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔARM) foi determinada pela diferença dos valores do conteúdo de água do solo obtidos nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte Equação [4]:

$$\Delta ARM = [\theta_f - \theta_i] L = A_f - A_i \quad [4]$$

Sendo A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

A umidade do solo crítica ($\theta_{crítica}$), pode ser determinada a partir da curva característica de retenção de água no solo da seguinte forma:

$$\theta_{crítica} = \theta_{CC} - (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times f$$

Sendo θ_{CC} a umidade na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$); θ_{PMP} , a umidade do solo correspondente ao ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$); f = fator de reposição de água ao solo (decimal). Para cana-de-águcar, foi considerada um fator de reposição de 0,5, de acordo o recomendado por Dinardo-Miranda, et al(2008).

Para a determinação do balanço hídrico foram instalados quatro sensores do tipo FDR, modelo EC-5 da Decagon Devices, nas profundidades de 0,20, 0,40, 0,60, e 0,80 m e cinco repetições em pontos distintos da área. Foi utilizada a calibração dos sensores sugerida pelo fabricante que compara a umidade volumétrica medida com esses sensores, com medidas gravimétrica e da sonda FDR.

O fluxo total de água (Q), ou seja, as perdas por drenagem ($-Q$) ou os ganhos por ascensão capilar ($+Q$), de água da zona radicular por meio do limite inferior do volume de solo estudado ($z = 0,60$ m), respectivamente, foram determinados a partir da Equação 5:

$$Q = \int_0^t q dt = q \int_0^t dt = q(t - 0) = q\Delta t \quad [5]$$

Sendo q ($mm dia^{-1}$) a densidade de fluxo de água no limite inferior do volume de solo delimitado pela zona radicular e dt o intervalo de tempo de estudo do balanço hídrico.

As densidades de fluxo q foram estimadas com base na equação de Darcy-Buckingham (Equação 6):

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta\Psi_t}{\Delta Z} \quad [6]$$

Sendo $K(\theta)$ (mm.d^{-1}) a condutividade hidráulica não saturada e $\Delta\Psi_t/\Delta Z$ o gradiente de potencial total em $z = 0,60$ m, obtido pela Equação 7 abaixo:

$$\frac{\Delta\Psi_t}{\Delta Z} = \frac{\Psi_{r0,20m} - \Psi_{r0,80m}}{\Delta Z} \quad [7]$$

Sendo Ψ_t o potencial total da água no solo ($\Psi_t = \Psi_m + \Psi_g$) e ΔZ igual a 0,20 m. O potencial gravitacional Ψ_g (m de água) foi definido pela posição no solo, ou seja, igual à profundidade Z ; e o potencial matricial Ψ_m (m de água), por meio da equação de Van Genuchten (1980) e dos dados da curva de retenção e dados da umidade atual do solo.

A curva de retenção (Anexo 01) foi obtida em laboratório usando-se extrator de Richards, de acordo com Embrapa (1997). Os dados das curvas de retenção da água no solo foram ajustados pela equação proposta por Van Genuchten (1980) (Equação 8):

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + |\alpha \Psi_m|^n \right]^{-m} \quad [8]$$

O modelo de Van Genuchten foi ajustado com o auxílio do aplicativo Soil Water Retention Curves (SWRC version 3.00 beta), desenvolvido por Dourado Neto et al. (2001).

A condutividade hidráulica do solo não saturado, $K(\theta)$, foi obtida por meio da equação de Brooks & Corey (1964) (Equação 9):

$$K(\theta) = K_s w^L \left[1 - \left(1 - w^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad [9]$$

Sendo K_s (mm.d^{-1}) a condutividade hidráulica do solo saturado; e n e m os parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten e w , foi obtido por meio da Equação 10.

$$w = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [10]$$

Para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), foi utilizado o método do permeâmetro de carga constante. Foram utilizadas 5 amostras com estrutura

indeformada na profundidade de 0,80 m, coletadas utilizando um amostrador de solo tipo Uhland, com anéis volumétricos, de 0,005 m de altura e diâmetro (Youngs, 1991).

A avaliação visual do perfil do sistema radicular da cana-de-açúcar foi realizado em junho e setembro de 2015. Foram abertas cinco trincheiras próximas aos locais de instalação dos sensores de umidade. As trincheiras tinham as seguintes dimensões: $0,90 \times 0,60 \times 0,80$ m de comprimento, largura e profundidade, respectivamente, onde foi analisado o perfil de 0 a 0,80 m de profundidade, em camadas a cada 0,10 m de espessura.

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi obtida pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO, de acordo com Allen et al. (1998). Os dados necessários (temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento) foram obtidos de uma estação meteorológica automática, situada a 7 km de distância da área de estudo.

Com base nos valores obtidos em campo para cana-de-açúcar, e o acompanhamento das diferenciações fenológicas, determinou-se a duração de cada fase do desenvolvimento da cultura e o K_c correspondente a cada dia do ciclo (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Coeficiente de cultura (K_c), para cada fase de desenvolvimento da cultura cana-de-açúcar (1ª soca)

CULTURA	Fases de desenvolvimento da cultura			Ciclo (dias)
	$K_{cInicial}$	$K_{cMédio}$	K_{cFinal}	
Cana-de-açúcar (soca)*	0,40	1,25	0,75	320

* Allen et al. (1998)

De posse dos dados para elaboração do balanço hídrico climatológico, empregou-se o método de Thornthwaite & Mather (1955). Considerando os dados médios das curvas de retenção, da densidade do solo e do comprimento médio do sistema radicular ($Z=0,60$ m) nos pontos amostrados, foi utilizado para capacidade de água disponível (CAD) o valor de 95,14 mm. A partir da contabilização das entradas e saídas de água do sistema foi estimada a ET_r da cultura durante o ciclo da cana-de-açúcar, sendo considerados os valores obtidos nos dias de passagem do satélite Landsat 8.

Para a estimativa da ET_r pelo SAFER, foram selecionadas imagens sem cobertura de nuvens do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS) órbita 220 e ponto 071, adquiridas gratuitamente no banco de imagens do *United States Geological Survey* – USGS (2015).

Como ferramenta de programação e cálculo utilizou-se a função *raster calculator* disponível no software gerenciador de Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permitiu o cálculo e aplicação da modelagem através de dados *raster*.

Para converter os valores quantizados e calibrados (DN) do sistema sensor LANDSAT 8 OLI para radiância e reflectância espectral, utilizou-se os coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens. Inicialmente foram realizadas correções atmosféricas e posteriormente realizou-se a conversão dos valores digitais em radiância espectral, como recomendado por Chander & Markham (2009) para cada banda por meio da Equação 11, sendo que a Radiância (L_λ) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica, sendo medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($Wm^{-2} sr^{-1}$).

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{Max} - L_{Min}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{calmax} - Q_{calmin}) + L_{min} \quad [11]$$

Em que:

L_λ = Radiância espectral ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)

L_{max} = radiância máxima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)

L_{min} = radiância mínima ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)

Q_{calmin} = valor mínimo do pixel em nível de cinza (DN)

Q_{calmax} = valor máximo do pixel em nível de cinza (DN)

Q_{cal} = Valor quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (DN)

Para cada banda foi 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 “resvala” num objeto como o topo de uma nuvem, um corpo d’água, ou o solo exposto (Equação 12):

$$p_\lambda = \frac{\pi \times L_\lambda}{ESUN_\lambda \times \cos Z \times E_0} \quad [12]$$

Sendo L_λ a radiância de cada banda; $ESUN_\lambda$ a irradiância espectral no topo da atmosfera; $\cos Z$ o ângulo zenital; E_0 correção distância terra-sol, em que E_0 é definido por (Equação 13):

$$E_0 = 1,000110 + 0,0342221 \omega_s(da) + 0,001280(da) + 0,000719 c \alpha (2 \times da) + 0,000077 \sin(2 \times da) \quad [13]$$

Sendo d_a o ângulo diário, em que d_a foi definido por (Equação 14):

$$da = (d_n - 1) \frac{2\pi}{365} \quad [14]$$

Sendo d_n o dia juliano da imagem.

A obtenção do albedo no topo da atmosfera foi feita pela Equação 15:

$$\alpha_{top} = \Sigma(\omega_p \times p_\lambda) \quad [15]$$

Sendo p_λ a reflectância; ω_λ o coeficiente de calibração para cada banda, em que ω_λ foi obtido pela Equação 16:

$$\omega_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\Sigma ESUN_\lambda} \quad [16]$$

As informações sobre o albedo de superfície foram obtidas pela Equação 17 utilizando os coeficientes propostos por Teixeira (2010):

$$\alpha_0 = 0,7 \times \alpha_{top} + 0,06 \quad [17]$$

Sendo α_{top} o albedo no topo da atmosfera, obtido na Equação 15.

Para elaborar a carta de temperatura da superfície utilizaram-se as imagens do infravermelho termal das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19 μm) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51 μm) do sensor TM do satélite Landsat-8, com resolução espacial de 100 metros.

A temperatura de superfície foi calculada pela Equação 18:

$$T_0 = 1,11 \times T_{bright} - 31,89 \quad [18]$$

Sendo T_{bright} foi obtido pela Equação 19:

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_{termal} + 1}\right)} \quad [19]$$

Sendo L_{termal} a radiância (L_λ) das bandas 10 e 11.

Em seguida estimou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) pela Equação 20:

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_5)}{(\rho_4 + \rho_5)} \quad [20]$$

Sendo ρ_5 a reflectância da banda 5 – infravermelho próximo; ρ_4 a reflectância da banda 4 – banda no vermelho.

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET/ET_0 (Equação 21).

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \times NDVI} \right) \right] \quad [21]$$

A implementação foi baseada em (Teixeira, 2012a), em que a e b são coeficientes de regressão, com valores de 1,90 e -0,008, respectivamente. ET_0 é a evapotranspiração de referência, dada em milímetros por dia (mm dia^{-1}).

Para aplicação do SAFER na região do estudo, o coeficiente “a” da Equação 11 foi ajustado para 1,0 considerando-se a similaridade entre os valores de coeficiente de cultura (K_c), provenientes das diretrizes da FAO, geralmente adotadas pelos produtores, e os resultados da razão ET/ET_0 modelada nas porções mais úmidas em áreas irrigadas por pivô central na região do Cerrado goiano.

Em seguida os valores instantâneos dessa relação foram então multiplicados pelos valores diários da ET_0 , chegando assim à ET_r , como demonstrado na Equação 22:

$$ET_r = \frac{ET}{ET_0} \times ET_0 \quad [22]$$

Sendo ET_r a evapotranspiração real (mm dia^{-1}); ET_0 a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

O desempenho do método de estimativa de evapotranspiração pelo SAFER foi avaliado correlacionando os valores estimados pelo balanço hídrico do solo e climatológico e os valores estimados pelo SAFER. Para a comparação dos dados de estimativa de evapotranspiração pelo SAFER, os dados coletados pontualmente nos 5 pixels (30 x 30 m)

referentes a área de instalação das baterias de sensores utilizadas para o monitoramento da variação no armazenamento da água no solo. A metodologia adotada para comparação dos resultados foi aquela proposta por Allen & Asce (1986), a qual se fundamenta no erro padrão de estimativa (EPE) (Equação 23), a estimativa de evapotranspiração foi avaliada ainda a partir do erro quadrático médio (EQM) (Equação 24), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 25) e o erro médio absoluto (EMA) (Equação 27).

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação (r^2) (Equação 28), a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A exatidão está relacionada à aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada por um índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (Equação 29) (Willmott et al., 1985). Seus valores variam de zero (para nenhuma concordância) a 1 (para a concordância perfeita).

O desempenho do modelo também foi avaliado utilizando-se o índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), conforme a Equação 30 em que r, é o coeficiente de correlação simples de Person (Equação 31) que determina a precisão do método e indica o grau de dispersão dos pontos em relação à média, o chamado erro aleatório e d é o índice de concordância. O coeficiente c é interpretado de acordo com os referidos autores como: "ótimo" ($c > 0,85$); "muito bom" (c entre 0,76 e 0,85); "bom" (c entre 0,66 e 0,75); "mediano" (c entre 0,61 e 0,65), "sofrível" (c entre 0,51 e 0,60), "mau" (c entre 0,41 e 0,50) e "péssimo" ($c < 0,40$).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n - 1}} \quad [23]$$

$$EQM = \sqrt{\sum(O_i - E_i)^2} \quad [24]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}} \quad [25]$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum |O_i - E_i| \quad [27]$$

$$r^2 = 1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - \bar{O})^2} \quad [28]$$

$$d = 1 - \left[\frac{\Sigma(E_i - O_i)^2}{\Sigma(|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad [29]$$

$$c = d \times r \quad [30]$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - \bar{O})^2}} \quad [31]$$

Sendo O_i o valor observado (ET_r estimada pelo balanço hídrico do solo), mm; E_i o valor estimado (ET_r obtida pelo SAFER), mm; O média dos valores observados, mm.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução dos componentes do balanço hídrico do solo é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Componentes do balanço hídrico em cana-de-açúcar de 23 de maio a 27 de agosto de 2015 na camada de 0-0,60 m, Santo Antônio de Goiás, GO.

Subperíodo	ΔArm (mm dia ⁻¹)	P (mm dia ⁻¹)	Q (mm dia ⁻¹)	ET_r (mm dia ⁻¹)
22 - 23/05/2015	-1,844	0,00	-0,151	1,693
07 - 08/06/2015	-1,153	0,00	-0,037	1,116
23 - 24/06/2015	-0,307	0,00	-0,004	0,303
09 - 10/07/2015	-1,294	0,00	-0,006	1,288
25 - 26/07/2015	-0,422	0,00	-0,005	0,417
10 - 11/08/2015	-0,017	0,00	-0,006	0,011
26 - 27/08/2015	-0,014	0,00	-0,005	0,019

ΔArm (armazenamento de água no solo); P (precipitação); Q (fluxo de água no limite inferior do volume de solo); ET_r (evapotranspiração real).

A variação do armazenamento de água no solo (ΔArm) corresponde ao saldo de água no solo, no intervalo de tempo considerado; se as entradas (precipitação e ascensão capilar) de água no volume de solo forem maiores que as saídas (evapotranspiração e drenagem) o ΔArm será positivo (o que não ocorreu em nenhum dos períodos, tendo em vista a não ocorrência de precipitação nos dias analisados), caso contrário será negativa (isto

ocorreu nos sete subperíodos). A variação no ΔArm apresentou uma oscilação de -1,844 a -0,014 mm, apresentando os menores valores (-0,017 e -0,014) no mês de agosto, período este em que a cultura já apresentava sinais de senescência em fase final de maturação e período em que se observou déficit hídrico mais acentuado como pode se observar na Figura 4.2, com umidade média no perfil do solo bem abaixo da umidade crítica.

A variação no armazenamento de água no solo (ΔArm) corresponde ao saldo de água no solo, no intervalo de tempo considerado; se as entradas (precipitação e ascensão capilar) de água no volume de solo forem maiores que as saídas (evapotranspiração e drenagem) o ΔArm será positivo (o que não ocorreu em nenhum dos períodos, tendo em vista a não ocorrência de precipitação nos dias analisados), caso contrário será negativa (isto ocorreu nos sete subperíodos). A variação no ΔArm apresentou uma oscilação de -1,844 a -0,014 mm, apresentando os menores valores (-0,017 e -0,014) no mês de agosto, período este em que a cultura já apresentava sinais de senescência em fase final de maturação e período em que se observou déficit hídrico mais acentuado como pode se observar na Figura 4.2, com umidade média no perfil do solo bem abaixo da umidade crítica.

Para os valores do fluxo de água no limite inferior do volume de solo (Q), observou-se que ocorreu somente drenagem (valores negativos). De forma geral esses valores seguiram as variações do ΔArm com maior drenagem nos períodos de maio a junho. Os baixos valores de drenagem encontrados podem ser explicados pelo fato de em praticamente todo período de estudo a umidade volumétrica estar abaixo da capacidade de campo, ou seja, com água retida apenas nos microporos do solo (a água drenada é proveniente dos macroporos), contribuindo dessa forma para a pobre estimativa deste termo (Reichardt et al., 1979; Netto et al., 2000).

Em relação à ET_r , observou-se que os maiores valores aconteceram nos subperíodos de 22-23/05/2015, período em que havia um maior volume de água no solo tendo em vista que última precipitação (30 mm) havia ocorrido 12 dias antes e no subperíodo de 09-10/07/2015, em que foi registrada uma precipitação de 2 mm no dia 08/07/2015 e outra precipitação de 1 mm no dia 13/07/2015. Brito et al. (2009), em estudos de balanço hídrico com cana-de-açúcar em Jaboticabal e Pirassununga, SP, também encontraram que a ET_r seguiu a distribuição temporal do conteúdo de água no solo, decorrente principalmente da distribuição das chuvas.

A Figura 4.4, ilustra os valores médios diários da precipitação pluvial (P), da variação na umidade do perfil (0,0-0,60 m) além dos valores médios da umidade na

capacidade de campo (Θ_{CC}), umidade crítica ($\Theta_{Crítico}$) considerando um fator de disponibilidade de água no solo de 0,5 e umidade no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}), durante os subperíodos avaliados, que compreende ao período de 22/05/2015 a 27/08/2015.

Verificou-se que após o dia 22/05/2015 houve uma diminuição do volume de água no solo, o que afetou diretamente a ET_r . Com o volume de água no solo se mantendo dentro da umidade crítica até o dia 09/07/2015 quando a cultura passou a sofrer com o déficit hídrico e consequentemente houve uma redução na ET_r . O decréscimo da ET_r no final do ciclo ocorre não somente devido às baixas precipitações pluviais e a grande redução da evaporação de água do solo, mas também à senescência das folhas, reduzindo a área foliar e, consequentemente, a área exposta à transpiração (Lima et al., 2006).

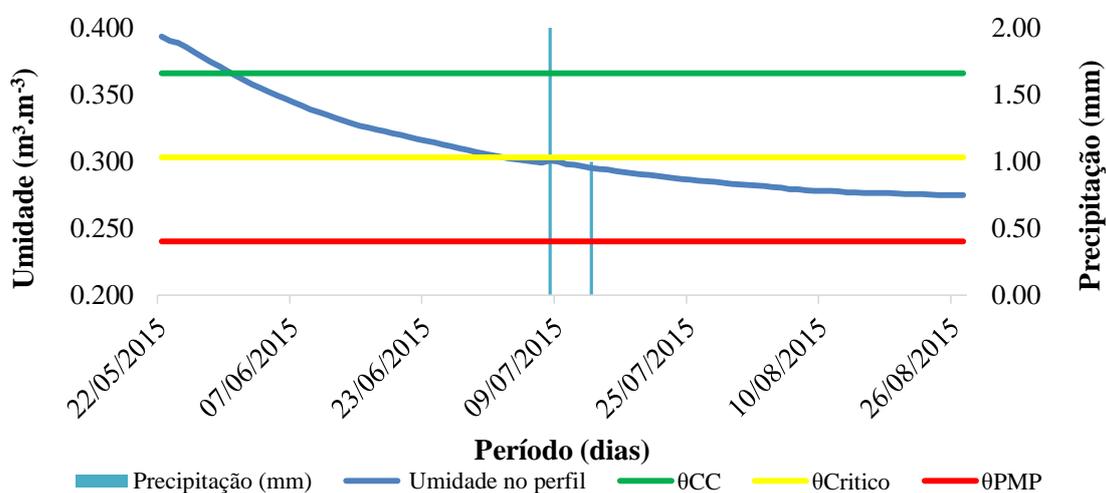


Figura 4.4. Valores médios diários da precipitação pluvial (P), da variação na umidade do perfil (0-0,60 m), valores médios de Θ_{CC} , $\Theta_{Crítico}$ e Θ_{PMP} , no período de 22/05/2015 a 27/08/2015.

Na Figura 4.5 e na Tabela 4.4 são apresentados os valores de evapotranspiração real (ET_{BHC}) estimadas pelo balanço hídrico climatológico, utilizando os K_c para a cana-de-áçúcar (FAO 56), para evapotranspiração utilizando o SAFER (ET_{SAFER}) e para a evapotranspiração utilizando o balanço hídrico do solo (ET_{BHS}) em sete datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura de cana-de-áçúcar. De forma geral a ET_{SAFER} , apresentou valores superiores a ET_{BHC} e ET_{BHS} . Observa-se ainda que, de maneira geral, as curvas geradas a partir dos dados obtidos pela ET_{SAFER} e ET_{BHS} , ao longo do período analisado seguem uma mesma tendência, o que reforça a concordância entre os dois métodos de obtenção da evapotranspiração real. Os valores de ET_{BHC} se mantiveram abaixo dos

valores obtidos pelo SAFER, e apresentando valores decrescentes constantes ao longo do período avaliado. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do balanço hídrico climatológico se tratar de um método matemático, diretamente influenciando pelos valores de K_c que apresentam comportamento decrescente com a aproximação da fase final da cultura.

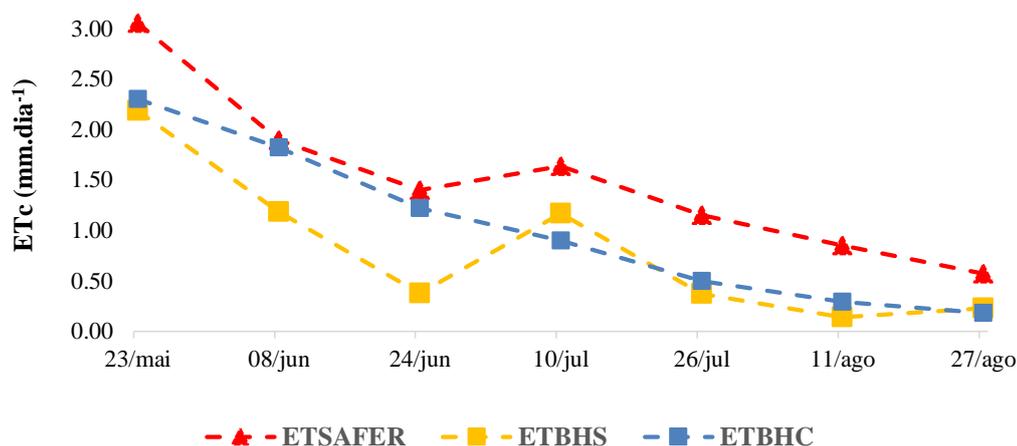


Figura 4.5. Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (CTC-4) estimada pelo SAFER (ET_{SAFER}) nas datas e pontos amostrados nas imagens em comparação com o balanço hídrico climatológico (ET_{BHC}) e o balanço hídrico do solo (ET_{BHS}), Santo Antônio-GO, 2015.

Tabela 4.4. Evapotranspiração de referência (ET_0), Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (ET_{SAFER}) nas datas e pontos amostrados nas imagens do satélite Lansat 8 em comparação com o balanço hídrico climatológico (ET_{BHC}) e o balanço hídrico do solo (ET_{BHS}).

Data	DAB	ET_0 (mm dia ⁻¹)	ET_{BHC} (mm dia ⁻¹)	ET_{BHS} (mm dia ⁻¹)	ET_{SAFER} (mm dia ⁻¹)
23/05/2015	234	2,70	2,30	2,18	3,06
08/06/2015	250	3,20	1,82	1,18	1,90
24/06/2015	266	3,30	1,22	0,38	1,40
10/07/2015	282	3,60	0,90	1,17	1,64
26/07/2015	298	3,34	0,50	0,37	1,15
11/08/2015	314	3,80	0,29	0,14	0,85
27/08/2015	330	4,60	0,18	0,23	0,57

DAB (dias após a brotação); ET_0 (evapotranspiração de referência); ET_{BHC} (estimativa de evapotranspiração pelo método do balanço hídrico climatológico); ET_{BHS} (estimativa de evapotranspiração pelo método do balanço hídrico do solo); ET_{SAFER} (estimativa de evapotranspiração pelo SAFER).

A Figura 4.6 apresenta a distribuição espacial dos valores da ET_{SAFER} (em $mm.dia^{-1}$) para as cana-de-açúcar nas datas de passagem do satélite Landsat 8 na área delimitada pelo estudo.

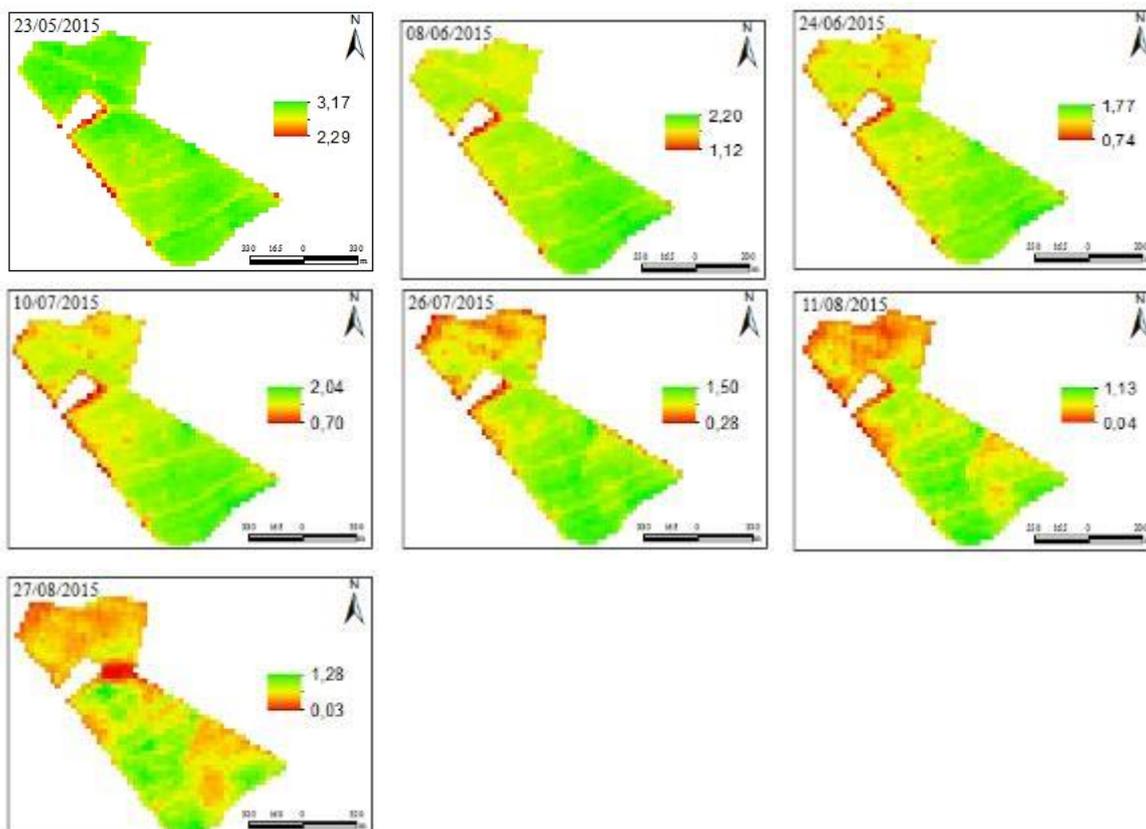


Figura 4.6. Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (CTC 4) referente ao período de maio a agosto de 2015 obtida pelo SAFER na área delimitada para o estudo, utilizando imagem Landsat-8, Santo Antônio-GO, 2015.

Na Tabela 4.5 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (EQM), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de estimativa de evapotranspiração obtidas pelo balanço hídrico do solo e o SAFER para a cultura da cana-de-açúcar.

Tabela 4.5. Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de evapotranspiração obtidas pelo balanço hídrico do solo e o balanço hídrico obtido pelo SAFER.

a	b	r^2	EMA	EPE	EQM	RMSE	d	r	c	Classificação
0,87	0,51	0,92	0,82	0,79	0,54	0,73	0,81	0,96	0,77	Muito bom

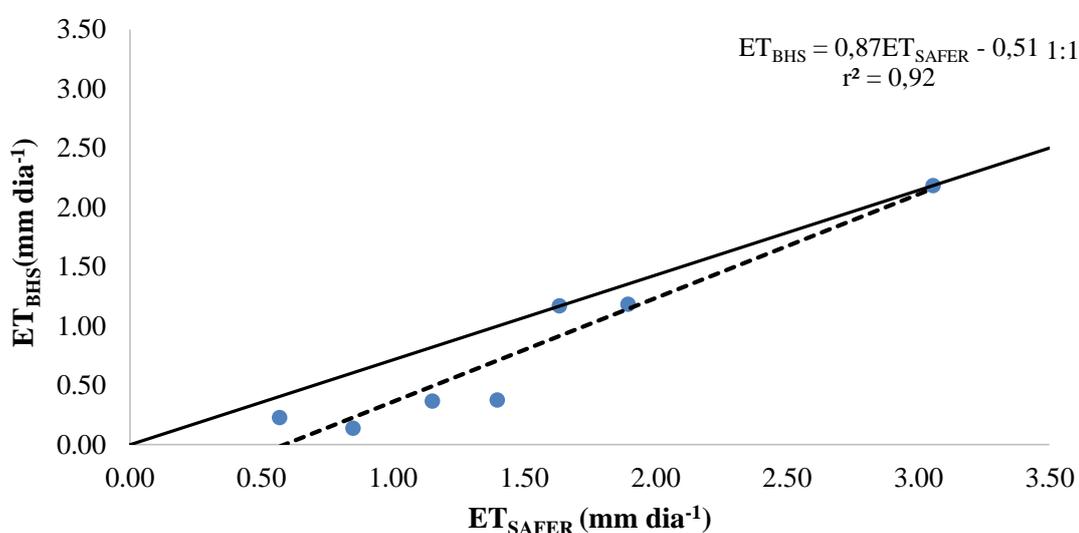


Figura 4.7. Comparativo da evapotranspiração real determinada pelo balanço hídrico do solo (ET_{BHS}), e a ET_{SAFER} , em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

De acordo com os resultados obtidos para a estimativa de evapotranspiração pelo SAFER, ($d = 0,81$; $EPE = 0,79$, $EMA = 0,82$), a partir do índice “c” ($0,77$) o método pode ser classificado com desempenho “muito bom”, ou seja, com índices de concordância próximos da unidade, caracterizando uma concordância quase perfeita.

Em geral, os resultados da estimativa da ET_r pelo SAFER, concordaram bem com o balanço hídrico do solo com valores de EQM médios em torno de $0,54 \text{ mm dia}^{-1}$ e de RMSE em torno de $0,73 \text{ mm dia}^{-1}$. O EMA referente a lâmina evapotranspirada foi em média $0,82 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto que o EPE, foi em média $0,79 \text{ mm dia}^{-1}$.

Destaca-se, também, que a equação de regressão obtida apresenta valor do coeficiente a próximo da unidade, evidenciando um bom desempenho (Figura 4.7). A

correlação de Pearson “r” apresentou valor de $r = 0,96$ muito próximo de um o que de acordo com Hoppinks (2000) pode ser considerada quase perfeita, enquanto que para o r^2 apresentou o valor de $r^2 = 0,92$ indicando uma forte relação entre as duas variáveis analisadas.

Na Tabela 4.6 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (EQM), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de estimativa de evapotranspiração obtidas pelo balanço hídrico climatológico e o balanço hídrico obtido pelo SAFER para a cultura da cana-de-açúcar.

Tabela 4.6. Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de evapotranspiração obtidas pelo balanço hídrico climatológico e o balanço hídrico obtido pelo SAFER.

a	b	r^2	EMA	EPE	EQM	RMSE	d	r	c	Classificação
0,92	0,36	0,90	0,56	0,58	0,29	0,54	0,88	0,95	0,84	Muito bom

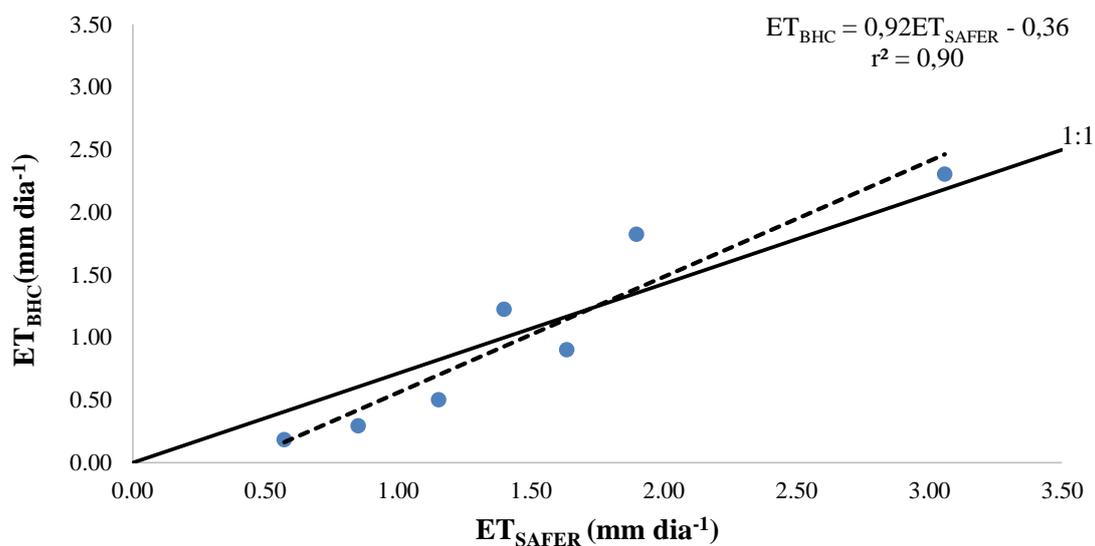


Figura 4.8. Comparativo da evapotranspiração real determinada pelo balanço hídrico do solo (ET_{BHC}), e a ET_{SAFER} , em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

De acordo com os resultados obtidos para a estimativa de evapotranspiração pelo SAFER, ($d = 0,88$; $EPE = 0,58$, $EMA = 0,56$), a partir do índice “c” (0,84) o método pode ser classificado com desempenho “muito bom”, ou seja, com índices de concordância próximos da unidade, caracterizando uma concordância quase perfeita.

Em geral, os resultados da estimativa da ET_r pelo SAFER, concordaram bem com o balanço hídrico climatológico com valores de EQM médios em torno de $0,29 \text{ mm dia}^{-1}$ e de RMSE em torno de $0,54 \text{ mm dia}^{-1}$. O EMA referente a lâmina evapotranspirada foi em média $0,56 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto que o EPE, foi em média $0,58 \text{ mm dia}^{-1}$.

Destaca-se, também, que a equação de regressão obtida apresentaram valores dos coeficientes a e b próximo da unidade, evidenciando um bom desempenho (Figura 4.8). A correlação de Pearson “r” apresentou valor de $r = 0,95$ muito próximo de um o que de acordo com Hoppinks (2000) pode ser considerada quase perfeita, enquanto que para o r^2 apresentou o valor de $r^2 = 0,90$ indicando uma forte relação entre as duas variáveis analisadas.

De forma geral, o SAFER estimou valores de ET_r em média $0,70 \text{ mm dia}^{-1}$ acima dos valores de estimativa obtidos com o balanço hídrico do solo e de $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$ para o balanço hídrico climatológico. A ordem de grandeza dos erros na estimativa de evapotranspiração real pelo SAFER é aceitável para fins de gestão dos recursos hídricos, principalmente considerando o baixo custo na obtenção da informação e a aplicação do método em larga escala.

Dessa forma, para correção da ET_r estimada pelo SAFER, recomenda-se a aplicação das equações de regressão obtidas neste estudo. As precisões alcançadas pelas estimativas de evapotranspiração obtidas pelo SAFER, são semelhantes e comparáveis aos desempenhos alcançados por algoritmos que utilizam técnicas de sensoriamento remoto e que são constituídos de metodologias de processamento bastante complexas a exemplo do SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) e METRIC (Allen et al., 2007).

A dependência de dados de imagens de satélites representa uma limitação relevante na aplicação de modelos de estimativa de evapotranspiração uma vez que somente imagens livres da presença de nuvens podem ser utilizadas. Outro fator a ser considerado é a escala temporal de aquisição dessas imagens, visto que para o Landsat 8 essa escala de obtenção de imagens é de 16 dias. Outro desafio para modelos que usam imagens de satélites para a obtenção da ET_r tornarem-se aplicáveis é a instalação de estações agrometeorológicas para a união de dados climáticos e parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, seguida

de testes em ecossistemas diversos, mas isso não pode ser considerado um problema já que também é uma exigência dos métodos micrometeorológicos. Portanto, a combinação destes dois métodos, sensoriamento remoto e micrometeorológico, podem ser utilizadas de maneira complementares

4.4 CONCLUSÃO

O método de balanço de energia utilizando o sensoriamento remoto e o modelo agrometeorológico SAFER pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar (variedade CTC 4 em 1º soca) em cultivo de sequeiro na região do Cerrado, utilizando o ajuste $ET_r = 0,87*ET_{SAFER} - 0,51$ para o balanço hídrico do solo e o ajuste $ET_r = 0,92*ET_{SAFER} - 0,36$ para o balanço hídrico climático.

4.5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. A.; ASCE, M. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, St. Joseph, v.112, n.4, p.348-386, 1986.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 301p. **Irrigation and Drainage, Paper 56**.

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

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; KJAERGAARD, J. Mapping evapotranspiration at high resolution, application manual for Landsat satellite imagery. Version 2.0.7. Kimberly: University of Idaho. 2010, p.248.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. **Journal of Hydrology**, Iowa, v. 212, n.1, p. 198-212, 1998.

BASTIAANSEN, W. G., ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 94, n. 4, p. 321-340, 2003a.

BASTIAANSEN, W. G., CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 58, p. 171-192, 2003b.

BASTIAANSEN, W. G., NOORDMAN, E. J., PELGRUM, H., DAVIDS, G., THORESON, B. P., ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 131, n. 2 p. 85-93, 2005.

BASTIAANSEN, W.G.; KARIMI, P.; REBELO, L. M.; DUAN, Z.; SENAY, G.; MUTHUWATTE, L.; SMAKHTIN, V. Earth Observation Based Assessment of the Water Production and Water Consumption of Nile Basin Agro-Ecosystems. **Remote Sensing**, Bellingham, WA USA: SPIE, v. 6, 10306-10334, 2014.

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

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; GHIBERTO, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.33, n. 4, p.295-303, 2009.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. Fort Collins, Colorado State University, 1964. (**Hydrology Paper, 3**)

BURDINE, N.T. Relative permeability calculation from size distribution data. **Trans. AIME**, New York, v.198, n. 1, p.71-78,1953.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2012** - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab 2013. 18 p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2015** - Companhia Nacional de Abastecimento – Brasília: Conab 2016. 70 p.

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

CRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. In: PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J. C. M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2010. p.158.

DALRI, A. B. Irrigação em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006. p. 157-170.

DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; VASCONCELOS, Antonio Carlos Machado de; LANDELL, Marcos Guimarães de Andrade. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Iac, 2008. 882 p. (1)

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q.; BOTREL, T.A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, n. 4, p.92-102, 1990.

ECHEVERRIA, C. P., FARIAS, S. O. Calibration and validation of a remote sensing algorithm to estimate energy balance components and daily actual evapotranspiration over a drip-irrigated Merlot vineyard. **Irrigation Science**, New York, v. 30, n. 4, p. 537-553, 2012.

ELHADDAD, A., GARCIA, L. A.; CHÁVEZ, J. L. Using a Surface Energy Balance Model to Calculate Spatially Distributed Actual Evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 137, n. 1, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Water productivity of diferente land uses in watersheds assessed from satellite imagery Landsat 5 Thematic Mapper. In: NEALE, C. M. U.; MALTESE, A. (Ed.). **Remote Sensing**. Bellingham, WA USA: SPIE. v. 9239, p. 92392E-1-92392E-7, 2014.

HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C; NEALE, C. M. U.; TAGHVAEIAN, S. large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the northwest of Sao Paulo State, Brazil. VII International Symposium On Irrigation Of Horticultural Crops. Leuven 1: **Int Soc Horticultural Science**, Lisboa, PT, v. 1038, n. 3, p. 263-270, 2014.

HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient: a new view of statistics**. 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em dezembro de 2015.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 3.ed. Piracicaba, ESALQ, 2005. 509p.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira Ciências Agrônomicas**, v. 30, n. 1, p. 89-95, 2006.

NAGLER, P; GLENN, E. P.; NGUYEN, U.; SCOTT, R. L.; DOODY, T. Estimating Riparian and Agricultural Actual Evapotranspiration by Reference evapotranspiration and MODIS Enhanced Vegetation Index. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 5 n 5, p. 3849-3871, 2013.

NETTO, A. M.; ANTONINO, A. C. D.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G.; DALL'OLIO, A. Condutividade hidráulica não saturada de um Podzólico Amarelo da zona da mata norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n. 2, p. 1221-1228, 2000.

PAPAKYRIAKOU, T. N.; MCCAUGHEY, J. H. An evaluation of the water balance technique for the estimation of evapotranspiration for a mixed forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Canada, v.21, n.11, p.1622-1631, 1991.

PREVEDELLO, C. L.; MAGGIOTTO, S. R.; LOYOLA, J. M. T.; DIAS, N. L.; BEPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, n.4 p. 1-8, 2007.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L.; SAUNDERS, L. C. U.; CADIMAZ, A. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.3, n. 4 p.1-5, 1979.

SILVA, R. A. B.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; GONDIM, P. S. S., SOUZA, E. S.; BARROS JUNIOR, G. BALANÇO HÍDRICO EM NEOSSOLO REGOLÍTICO CULTIVADO COM BRAQUIÁRIA (*Brachiaria decumbens* Stapf). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 38, p. 147-157, 2014.

SOARES, R. A. B.; OLIVEIRA, P. F. M.; CARDOSO, H. R.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A.; ROSENFELD, U. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB – Açúcar, Álcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, n. 4, p. 38-41. 2008.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 2, n. 5, 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 Press: Wallingford, UK; pp. 154–157, 2012 a.

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, 2012, Edinburgh. Proc. SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, XIV, v. 8531. p. 1-10, 2012b.

TEIXEIRA, A. H. C.; SHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. **Water productivity assessment by using MODIS images and agrometeorological data in the Petrolina municipality, Brazil**. Remote Sensing, Edinburgh, United Kingdom, v. 8531, p. 1-10, 2012c.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 32p. 2013a. (Documentos, 99).

TEIXEIRA, A. H. C.; WARREN, S. M.; LOPES, H. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; NEALE, C. M. U. Large-scale water productivity assessments with

modis imagens in changing semi-arid environment: A Brazilian case study. **Remote Sensing**, Bellingham WA, USA, v. 5, n. 11, p. 5783 – 5804, 2013b.

TEIXEIRA, A. H. C.; LOPES, H. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; WARREN, S. M.; ANDRADE, R. G.; NEALE, C. M. U. Retrieving water productivity parameters by using Landsat images in the Nilo Coelho irrigation scheme, Brazil. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **SPIE Remote Sensing**. [S.l.], p. 888713–888713, 2013c.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; WARREN, S. M.; BASSOI, L. H. Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatio temporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In: PETROPOULOS, G. G., (Ed.). **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**. 1. ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, v. 1, cap. 6, p. 169–191, 2014a.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. In: NEALE, C. M. U.; MALTESE, A. (Ed.). **Proceedings Of SPIE**. Bellingham, WA USA: SPIE, v. 9239, p. 923900–1–923900–10, 2014b.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Publications in **Climatology**, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955.104p.

TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; TASUMI, M. Estimation of Actual Evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico Using MODIS and Landsat Imagery with the METRIC Model. **Remote Sensing**. Bellingham, WA USA, v. 5, n. 12, 5, p. 5397-5423, 2013.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat Project Description. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php> Acesso em julho de 2015

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n, 2, p.892-898, 1980.

WARREN, M. S. Desagregação espacial de estimativas de evapotranspiração real obtidas a partir do sensor MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Porto Alegre, v. 28, n. 2, p. 153-162, 2013.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n.C5, p.8995-9005, 1985.

YOUNG, M. H.; WIERENGA P. J.; MANCINO C. F. Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies. **Soil Science**, Baltimore, v.161, p.491–501, 1996.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A validação de um modelo mais preciso para estimativa da evapotranspiração e dos coeficientes de cultura nas condições do Cerrado goiano é fundamental para estudos do uso da água em escala regional especialmente considerando a atual área irrigada, bem como a sua ampliação, e o impacto sobre a vegetação natural e bacias hidrográficas face a mudança no uso do solo e escassez de recursos hídricos. A construção de séries temporais de evapotranspiração em larga escala e média resolução espacial pode ser uma ferramenta auxiliar qualitativa no trabalho de fiscalização de recursos hídricos, como o cotejo com outorgas de uso d'água, no qual áreas irrigadas com altos valores de evapotranspiração obtidos remotamente podem ser selecionados visando a fiscalização *in-loco*.

Outras possibilidades incluem ainda o balanço hídrico em bacias hidrográficas, monitoramento de estiagens e modelos de previsão de safra. As estimativas de evapotranspiração podem ser utilizadas ainda na obtenção remota de outras variáveis hidrológicas, tais como o teor de água na zona radicular, lâmina d'água irrigadas, déficit hídrico, com importantes aplicações na gestão de recursos hídricos.

A principal vantagem da estimativa de evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto, em comparação aos métodos micrometeorológicos tradicionais, é que a estimativa pode ser feita exclusivamente por meio do balanço de energia, não sendo necessário se conhecer dados da cobertura vegetal (ex. coeficiente da cultura ou resistência aerodinâmica) e do teor de água no solo (ex. coeficiente de estresse hídrico ou resistência superficial). No entanto, para o manejo da irrigação, é desejável o uso de estimativas de evapotranspiração com alta frequência temporal, tendo em vista que a dinâmica da evapotranspiração ao longo do tempo, sofre alteração em função da quantidade de água precipitada ou aplicada por irrigação sobre o solo.

Considerando a atual geração de satélites, o Landsat 8 tem se destacado, por dispor de sensores termais necessários para o cálculo da evapotranspiração, contudo apresenta como limitação, sua resolução temporal, tendo em vista que o padrão espaço-

temporal da precipitação/ irrigação altera a evapotranspiração em intervalo bastante inferior a 16 dias.

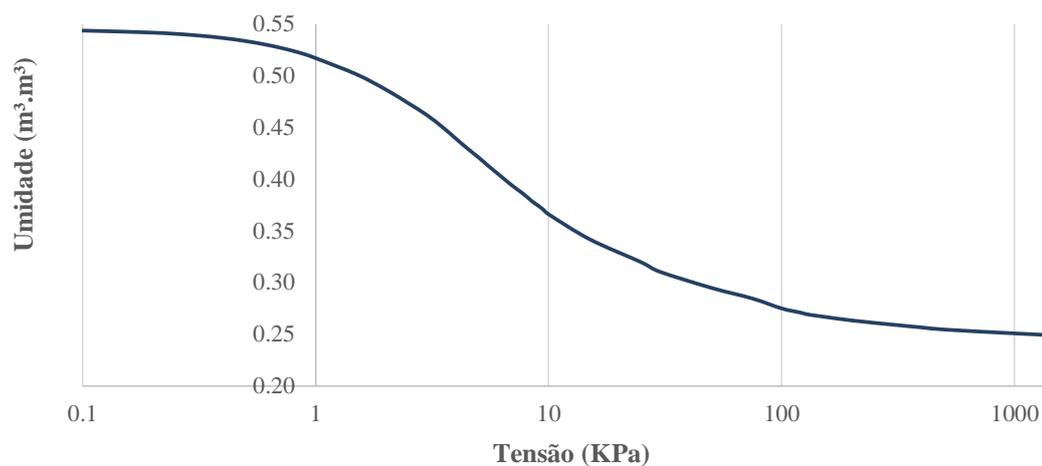
A ordem de grandeza dos erros na estimativa de evapotranspiração pelo SAFER é aceitável para fins de gestão dos recursos hídricos, principalmente considerando o baixo custo na obtenção da informação e a aplicação do método em larga escala. Cabe ressaltar que ao compará-lo com o método padrão FAO 56 em áreas irrigadas houve uma tendência do modelo em subestimar a evapotranspiração em situações de menor índice foliar o mesmo acontecendo com o período de senescência das culturas. Por outro lado ao compará-lo com os métodos tradicionais de balanço hídrico, o modelo superestimou a evapotranspiração em ambos os casos, sendo a diferença, menor em relação ao balanço hídrico climático, ressaltando a boa correlação do modelo com o método padrão FAO.

Para o modelo SAFER tornar-se aplicável em outros ecossistemas e regiões, existe a necessidade de se fazer ajustes nos coeficientes da equação que relacionam a fração da evapotranspiração atual à de referência, com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto. Após essas calibrações em conjunto com redes de estações agrometeorológicas, as estimativas de evapotranspiração em diferentes agroecossistemas em larga escala podem ser bem quantificadas.

6 ANEXO

Tabela 6.1. Parâmetros da curva de retenção de água no solo média da área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, (16° 29' S; 49° 18' W; 780 m).

Tensão (Kpa)	$\Theta(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$
0,0	0,545
1,0	0,517
3,0	0,462
6,0	0,406
10,0	0,366
33,0	0,312
50,0	0,295
70,0	0,286
100,0	0,275
120,0	0,271
125,0	0,270
130,0	0,269
150,0	0,267
200,0	0,263
300,0	0,259
400,0	0,257
500,0	0,254
1000,0	0,251
1500,0	0,249



$$\alpha = 0,464 \quad m = 0,380 \quad n = 1,629 \quad \Theta_s = 0,545 \quad \Theta_r = 0,249$$

Figura 6.2. Curva de retenção de água no solo média da área de estudo de evapotranspiração em cana-de-açúcar: Santo Antônio de Goiás, 10 Km de Goiânia e 180 km de Brasília-DF, ($16^\circ 29' \text{ S}$; $49^\circ 18' \text{ W}$; 780 m).