



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

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA A
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
ATUAL E DIAGNÓSTICO DO MANEJO DA
IRRIGAÇÃO DA CULTURA DO TOMATE
INDUSTRIAL EM GOIÁS**

CAROLINA CARVALHO ROCHA SENA

Orientador:

Prof. Dr. José Alves Júnior



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES 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/UFMG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), 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.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFMG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Carolina Carvalho Rocha Sena

3. Título do trabalho

Uso do sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração atual e diagnóstico do manejo da irrigação da cultura do tomate industrial em Goiás

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO*

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **José Alves Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 24/03/2021, às 05:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **CAROLINA CARVALHO ROCHA SENA, Discente**, em 24/03/2021, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do

26/03/2021

SEI/UFMG - 1920493 - Termo de Ciência e de Autorização (TECA)



[Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](#), informando o código verificador **1920493** e o código CRC **46EDEBA1**.

Referência: Processo nº 23070.007746/2021-59

SEI nº 1920493

CAROLINA CARVALHO ROCHA SENA

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA A ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL E DIAGNÓSTICO DO MANEJO DA
IRRIGAÇÃO DA CULTURA DO TOMATE INDUSTRIAL EM GOIÁS**

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

Coorientadores:

Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza

Prof. Dr. Rafael Battisti

Goiânia, GO - Brasil
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

SENA, CAROLINA CARVALHO ROCHA

Uso do sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração atual e diagnóstico do manejo da irrigação da cultura do tomate industrial em Goiás [manuscrito] / CAROLINA CARVALHO ROCHA SENA. - 2021.

135, CXXXV f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Alves Júnior; co-orientador Dr. João Maurício Fernandes Souza; co-orientador Dr. Rafael Battisti.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia, 2021.

Bibliografia. Anexos.

Inclui mapas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Solanum lycopersicum L.. 2. Manejo de irrigação. 3. Geoprocessamento. 4. Landsat 8. 5. Pivô Central. I. Alves Júnior, José, orient. II. Título.

CDU 631/635



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 36/2021 da sessão de Defesa de Tese de Carolina Carvalho Rocha Sena que confere o título de Doutora em Agronomia, na área de concentração em Solo e Água.

Aos 26/02/2021, vinte e seis dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um, a partir das 14:00, catorze horas, por videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada "Uso do sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração atual e diagnóstico do manejo da irrigação da cultura do tomate industrial em Goiás". Os trabalhos foram instalados pelo Orientador e Presidente da Banca Examinadora, Prof. José Alves Júnior (EA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Derblai Casaroli (EA/UFG), membro titular interno; Dr. Alexandre Bryan Heinemann (Embrapa Arroz e Feijão), membro titular interno; Prof. Pedro Rogério Giongo (UEG), membro titular externo; Dr. Ricardo de Souza Bezerra (Cargill), membro titular externo. Durante a arguição, os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido a candidata APROVADA pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Presidente da Banca Examinadora, Prof. José Alves Júnior, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos 26/02/2021, vinte e seis dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por José Alves Júnior, Professor do Magistério Superior, em 26/02/2021, às 18:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Derblai Casaroli, Professor do Magistério Superior, em 27/02/2021, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Alexandre Bryan Heinemann, Usuário Externo, em 01/03/2021, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Pedro Rogério Giongo, Usuário Externo, em 08/03/2021, às 11:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 1869341 e o código CRC A8F4CC6.

26/03/2021

SEI/UFMG - 1869341 - Ata de Defesa de Tese



Referência: Processo nº 23070.007746/2021-59

SEI nº 1869341

À Deus, a minha mãe e *in memoriam* de todos os entes queridos vítimas do corona vírus.

Consagre ao Senhor tudo o que você faz e os seus planos serão bem-sucedidos.
Provérbios 16:3

AGRADECIMENTOS

Quanta gratidão e felicidade sinto ao chegar até aqui, não somente pelo título, mas pelo conhecimento e experiência adquirida nesses anos. E sempre contei com a ajuda e incentivos de muitos e assim agradeço:

A Deus por ter me dado saúde, força, persistência e sabedoria, porque sem a sua onipresença nada seria.

A minha mãe, a mãe mais linda do mundo, por todo amor e carinho que me deste, por todo incentivo a minha formação acadêmica. A senhora é a personificação da minha força e luta.

Ao meu marido lindo, Vinicius Cesar, por todo companheirismo, e por ter conhecido o estado da arte da paciência durante o meu doutorado.

A minha irmã Luma, pelo carinho e perseverança na maninha que será doutora.

As minhas sobrinhas Isabela e Helena, porque sem elas o meu equilíbrio mental e emocional não existiria.

Ao meus sogros, Cida e Lúcio, aos meus cunhados Artur e Nathalia por sempre estarem presentes torcendo pelo sucesso dessa minha caminhada.

Aos meus amigos Edilaine e Marcus, pela ajuda na execução desse trabalho e que pela simples presença e preocupação comigo me dava alento.

Ao meu amigo Zeuxis, por tudo, por ser meu tutor online, por me escutar e, principalmente, por me entender.

Aos amigos, Elson Jr., Welinton, Antônio e Nara, pelos anos de convivência que serão lembrados para sempre.

Ao estimado colega Wilson por ser um exemplo de camaradagem, astúcia, força e gentileza a ser seguido. Que você esteja em paz.

Ao meu coorientador Dr. Rafael Battisti por todas as contribuições enriquecedoras feitas a este trabalho.

Agradeço o Dr. João Maurício, meu estimado coorientador, pela compreensão, disponibilidade e pelos conhecimentos transferidos.

Ao meu orientador Dr. José Alves Junior, um exemplo de inspiração e admiração, obrigada pelos ensinamentos científicos, técnicos e pelas longas conversas. Por estar sempre disponível, por me manter motivada, com seu jeito eloquente de ser.

A Universidade Federal de Goiás (UFG), ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), a empresa Cargill, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES).

Ao NUCLIRH (Núcleo de Pesquisa em Clima e Recursos Hídricos do Cerrado) que de alguma maneira ajudaram na realização desse trabalho.

E a todos aqueles que, embora não nomeados, me contemplaram com uma simples palavra amiga ou que contribuíram direta ou indiretamente com esse momento.

Fica aqui o meu muito obrigada.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	11
RESUMO GERAL	13
GENERAL ABSTRACT	14
1 INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1 REFERÊNCIAS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET)	20
2.2 BALANÇO DE ENERGIA	23
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	24
2.3.1 METRIC	26
2.3.2 SAFER	28
2.4 CULTURA DO TOMATE	31
2.4.1 Tomate para processamento industrial	31
2.4.2 Importância econômica do tomate para processamento industrial.....	33
2.4.3 Irrigação na produção de tomate para processamento industrial.....	33
2.7 REFERÊNCIAS	35
3 SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CULTURA DO TOMATE PARA PROCESSAMENTO INDUSTRIAL	47
3.1 INTRODUÇÃO	48
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo	49
3.2.2 Balanço hídrico do solo	51
3.2.3 Imagem do Landsat 8	53
3.2.4 Implementação do algoritmo SAFER para estimativa da ET_a	54
3.2.5 Implementação do algoritmo METRIC para estimativa da ET_a	57
3.2.6 Evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficiente da cultura (K_c)	63
3.2.7 Análise estatística	64
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
3.4 CONCLUSÕES.....	87
3.5 REFERÊNCIAS	87
4 DIAGNÓSTICO DO MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE TOMATE PARA PROCESSAMENTO INDUSTRIAL EM GOIÁS	94
4.1 INTRODUÇÃO	95
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	96
4.2.1 Área de estudo, clima e sistema de cultivo.....	96
4.2.2 Caracterização do solo	98

4.2.3	Análise da planta	99
4.2.4	Diagnóstico da irrigação	100
4.2.5	Análise dos dados	102
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
4.3.1	Diagnóstico do manejo da irrigação	104
4.3.2	Frequência de irrigação e risco de escoamento de água na superfície do solo	107
4.3.3	Características do solo	111
4.5	CONCLUSÕES	117
4.6	REFERÊNCIAS	118
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
	ANEXOS	127

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 2.1	Aplicações dos modelos METRIC e SAFER para a estimativa da evapotranspiração utilizando imagens do satélite Landsat.....	30
Tabela 3.1	Coordenadas geográficas e altitude das áreas de estudo.....	50
Tabela 3.2	Descrições técnicas do cultivo de tomate para processamento industrial nas áreas estudadas.....	51
Tabela 3.3	Características das bandas do Landsat 8 OLI/TIRS, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda (λ), irradiâncias espectrais no topo da atmosfera ($ESUN\lambda$) e coeficientes de calibração ($\omega\lambda$).....	53
Tabela 3.4	Coefficientes da cultura do tomate (K_c) de acordo com a FAO e Embrapa.....	64
Tabela 3.5	Critério de interpretação do índice de confiança (Camargo & Sentelhas, 1997)	65
Tabela 3.6	Acumulado térmico para o período de cultivo, de precipitação, da ET_o e da lâmina de irrigação do tomateiro industrial para as áreas avaliadas em 2018 e 2019.....	66
Tabela 3.7	Evapotranspiração do tomate para processamento industrial, nas datas de passagem do Landsat 8, de acordo com o balanço hídrico do solo (BHS), FAO, Embrapa, SAFER e METRIC.....	67
Tabela 3.8	Erro quadrado médio (EQM, $mm\ dia^{-1}$), erro médio absoluto (EMA, $mm\ dia^{-1}$), raiz do erro médio absoluto (REMA, $mm\ dia^{-1}$), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de confiança (c) para os valores de evapotranspiração obtidos pelos modelos SAFER e METRIC comparando-os aos métodos ET_{FAO} , $ET_{Embrapa}$ e ET_{BHS}	77
Tabela 3.9	Erro quadrado médio (EQM, $mm\ dia^{-1}$), erro médio absoluto (EMA, $mm\ dia^{-1}$), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de confiança (c) para os valores de evapotranspiração obtidos pelos modelos, SAFER e METRIC, comparando-os aos métodos ET_{FAO} , $ET_{Embrapa}$ e ET_{BHS} em relação aos estádios de desenvolvimento do tomate para processamento industrial.....	85

Tabela 4.1	Coordenadas geográficas, altitude (m) e área analisada (ha) para o diagnóstico do uso da água de irrigação na produção de tomate para processamento industrial em Goiás 2018/2019.....	97
Tabela 4.2	Relação do número de dias do ciclo (Ciclo - Dias), data de transplante e colheita, temperatura média do ar (Temp. - °C), acúmulo térmico (AT - °C), produtividade (Prod. - t ha ⁻¹), sólidos solúveis totais (SST - °Brix) e híbridos utilizados nas áreas analisadas de cultivo de tomate para processamento industrial em Goiás.....	98
Tabela 4.3	Estádios fenológicos da cultura do tomate para processamento industrial de acordo com o acúmulo térmico (°C), profundidade efetiva radicular e coeficientes de cultura (K _c).....	101
Tabela 4.4	Diagnóstico do manejo da irrigação na produção de tomate para processamento industrial em áreas irrigadas por pivô central em Goiás (2018/2019)	105
Tabela 4.5	Risco de escoamento de água no solo em função das lâminas de irrigação, intensidades de aplicação de água nas extremidades finais dos pivôs centrais, e regulação mínima do percentímetro para evitar o escoamento.....	108
Tabela 4.6	Evapotranspiração média da cultura do tomate em cada estágio fenológico, e frequência máxima de irrigação recomendada para evitar o escoamento de água no solo.....	110
Tabela 4.7	Análise química foliar do tomateiro industrial (Goiás – 2019)	114

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1	Balço energético entre a superfície e a atmosfera na cultura do tomate. LE é o fluxo de calor latente; K_i é a irradiância solar incidente; H é o fluxo de calor sensível no ar; G é o fluxo de calor no solo.....	23
Figura 2.2	Estádios fenológicos do tomateiro industrial: a - Estabelecimento inicial; b - Vegetativo; c - Frutificação; d - Maturação.....	32
Figura 3.1	Mapa da localização dos municípios e das áreas de estudo.....	50
Figura 3.2	Esquema da instalação dos sensores de umidade do solo EC-5 em campo de tomate para processamento industrial.....	52
Figura 3.3	Fluxograma referindo-se à sequência metodológica utilizada para estimar a evapotranspiração pelo algoritmo SAFER.....	54
Figura 3.4	Fluxograma referindo-se à sequência metodológica utilizada para estimar a evapotranspiração pelo algoritmo METRIC.....	57
Figura 3.5	Distribuição espacial e temporal da evapotranspiração do tomate para processamento industrial estimada pelos modelos SAFER (ET_{SAFER}) e METRIC (ET_{METRIC}).....	72
Figura 3.6	Evapotranspiração observada pelos modelos FAO-56, Embrapa, BHS e estimada pelos algoritmos SAFER e METRIC para a cultura do tomate para processamento industrial em Goiás.....	75
Figura 3.7	Reta 1:1, comparando a evapotranspiração estimada pelo modelo SAFER (ET_{SAFER}), METRIC (ET_{METRIC}) aos métodos padrões FAO (ET_{FAO}), Embrapa ($ET_{Embrapa}$) e balanço de água no solo (ET_{BHS})	82
Figura 3.8	Reta 1:1, comparando a evapotranspiração estimada pelo modelo SAFER (ET_{SAFER}), METRIC (ET_{METRIC}) aos métodos padrões FAO (ET_{FAO}), Embrapa ($ET_{Embrapa}$) e balanço de água no solo (ET_{BHS}) em relação aos estádios de desenvolvimento do tomateiro industrial.....	84
Figura 4.1	Mapa da localização das áreas de estudo.....	97
Figura 4.2	a. Bateria de sensores composta por um pluviômetro e três sensores de umidade de solo acoplados a um datalogger; b. Esquema da instalação dos sensores de umidade do solo EC-5 em campo de tomate para processamento industrial.....	100

Figura 4.3	Comportamento climático representado pela precipitação pluviométrica (mm), e temperatura do ar máxima e mínima (°C) nas áreas avaliadas de produção de tomate para processamento industrial.....	104
Figura 4.4	Distribuição espacial da granulometria do solo nas camadas de 0,0 – 0,1; 0,1 – 0,3; e 0,3 – 0,5 m.....	112
Figura 4.5	Distribuição espacial da densidade do solo nas camadas de 0,0 – 0,1; 0,1 – 0,3 e 0,3 – 0,5 m.....	113
Figura 4.6	Temperaturas foliares do tomateiro para processamento industrial e temperatura média do ar (°C).....	117
Figura 4.7	Potencial de água na folha (Mpa) do tomateiro para processamento industrial.....	117

RESUMO GERAL

SENA, C. C. R. **Uso do sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração atual e diagnóstico do manejo da irrigação da cultura do tomate industrial em Goiás**, 2021. 135 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.¹

O cultivo do tomate para processamento industrial em Goiás é realizado no período de estiagem, fazendo-se necessário o uso da irrigação, entretanto, usualmente o seu manejo é realizado de forma empírica, o que pode acarretar erros por excesso ou déficit hídrico. Dessa maneira, monitorar o manejo atual da irrigação, assim como, aprimorar os conhecimentos sobre a evapotranspiração da cultura, são práticas fundamentais para melhorar os dimensionamentos de novos projetos de irrigação, a gestão dos recursos hídricos e o manejo da irrigação. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho dos algoritmos *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) e *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) na estimativa da evapotranspiração atual (ET_a) do tomate para processamento industrial e analisar o uso da água de irrigação desta cultura no centro-sul de Goiás. Ambos estudos foram realizados em nove áreas em que se produz tomate para processamento industrial irrigadas por pivô central, em Goiás, durante o ano de 2018 e 2019. O estudo foi dividido em duas etapas: na primeira etapa, utilizando imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, para estimativa da ET_a pelos modelos SAFER e METRIC comparando com a ET obtida pelos métodos da FAO, Embrapa e balanço hídrico do solo a partir de índices estatísticos. Na segunda etapa, para o monitoramento da irrigação do tomate para processamento industrial, as lâminas de irrigações foram registradas com o uso de pluviômetros instalados nas áreas de cultivo e as demandas hídricas foram estimadas de acordo com as recomendações da FAO, utilizando o K_c da Embrapa. A ET_a do tomateiro para processamento industrial estimada pelos algoritmos durante todo o ciclo variou entre 0,85 e 5,20 mm dia⁻¹, em média geral. O modelo SAFER proporcionou melhor correlação com os métodos padrões quando comparado com o METRIC, com coeficiente de correlação variando de 0,64 a 0,99. Os algoritmos apresentaram bons desempenho estatísticos na estimativa da ET_a nas fases II e III do tomate para processamento industrial. Já o diagnóstico do manejo da irrigação indicou que em todas as áreas avaliadas ocorreram erros nos manejos de irrigação, ao considerar o total de água aplicado no ciclo. Os resultados mostraram que as demandas hídricas variaram de 280,3 a 436,8 mm, em 109 a 129 dias de ciclo. O erro médio por excesso de água aplicada foi de 83,4 mm, representando 77,8% das áreas analisadas, e o erro por déficit foi de 39,3 mm, correspondendo a 22,2% das áreas analisadas. O estudo ainda revelou que em todas as áreas as irrigações foram realizadas na frequência errada o que pode ter ocasionado o escoamento de água na superfície do solo. Estes resultados apontam para um manejo incorreto da irrigação na produção de tomate para processamento industrial em Goiás.

Palavras-chave: *Solanum lycopersicum* L.; Manejo da irrigação; Geoprocessamento; Landsat 8; Pivô central

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

Coorientador: Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza. UniEVANGÉLICA.

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Battisti. EA/UFG.

GENERAL ABSTRACT

SENA, C. C. R. **Use of remote sensing to estimate current evapotranspiration and diagnosis of irrigation management for industrial tomato crops in Goiás**, 2021. 135 f. Thesis (Doctorate degree in Agronomy: Soil and Water) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.²

The cultivation of processing tomatoes in Goiás is carried out during the dry season, making irrigation necessary, however, usually its management is carried out empirically, which can lead to errors due to excess or water deficit. Thus, monitoring current irrigation management, as well as improving knowledge about crop evapotranspiration, are fundamental practices to improve the sizing of new irrigation projects, the management of water resources and the management of irrigation. Thus, this study aimed to evaluate the performance of the Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving (SAFER) and Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration (METRIC) algorithms to estimate the current evapotranspiration (ET_a) of processing tomatoes and to analyze the use of tomatoes of irrigation water for this crop in south-central Goiás. Both studies were carried out in nine areas where processing tomatoes irrigated by a central pivot, in Goiás, during 2018 and 2019. The study was divided into two stages: in the first stage, using images from the Landsat 8 OLI/TIRS, for estimation of ET_a by SAFER and METRIC models comparing with ET obtained by FAO, Embrapa and soil water balance based on statistical indexes. The ET_a of the processing tomato estimated by the algorithms throughout the cycle varied between 0.85 and 5.20 mm day⁻¹, in general average. The SAFER model provided a better correlation with standard methods when compared to METRIC, with a correlation coefficient ranging from 0.64 to 0.99. The algorithms showed good statistical performance in the estimation of ET_a in phases II and III of the processing tomato. The diagnosis of irrigation management indicated that in all the evaluated areas there were errors in irrigation management, when considering the total water applied in the cycle. The results showed that the water demands varied from 280.3 to 436.8 mm, in 109 to 129 days of cycle. The average error for excess water applied was 83.4 mm, representing 77.8% of the analyzed areas, and the deficit error was 39.3 mm, corresponding to 22.2% of the analyzed areas. The study also revealed that in all areas the irrigation was carried out at the wrong frequency, which may have caused the runoff of water on the soil surface. These results point to an incorrect management of irrigation in the production of processing tomatoes in Goiás.

Key words: *Solanum lycopersicum* L.; Water management; Geoprocessing; Landsat 8; Center pivot

² Adviser: Prof. Dr. José Alves Júnior. EA/UFG.

Co-Adviser: Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza. UniEVANGÉLICA.

Co-Adviser: Prof. Dr. Rafael Battisti. EA/UFG.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é a segunda hortaliça mais cultivada no mundo, e produz frutos ricos em vários nutrientes e vitaminas, além de deter grande importância econômica e social (Peixoto et al., 2017; Moura & Golynski, 2018). A cadeia produtiva do tomate para processamento industrial apresenta relevante importância no agronegócio brasileiro, sendo o Brasil o oitavo maior produtor mundial (WPTC, 2020).

Dentro da produção nacional, o estado de Goiás é o maior produtor de tomate para processamento industrial, sendo responsável por produzir 57,88% da produção (IBGE, 2019). O tomateiro é uma das hortaliças mais exigentes em água, com o consumo médio de 300 a 650 mm, e no estado, o seu cultivo ocorre principalmente durante a estação seca, sendo a irrigação por pivô central o sistema mais utilizado (Marouelli et al., 2012).

A irrigação é um dos principais desafios para a produção de tomate para processamento industrial (Melo & Vilela, 2005), posto que, tanto o excesso quanto o déficit hídrico prejudicam a cadeia produtiva (Marouelli & Silva, 2006; Franca et al., 2017). O manejo dessa técnica é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas de tomateiro, proporcionando aumento da eficiência do uso da água e de nutrientes, contribuindo para o rendimento potencial e qualidade de frutos (Marouelli et al., 2012).

O manejo da irrigação é, geralmente, realizado de forma inadequada por parte dos produtores (Silva et al., 2018; Basílio et al., 2019), o que pode ocasionar impactos aos recursos hídricos, deterioração do solo, incremento da incidência de doenças, queda de produtividade e na qualidade do fruto, aumentando o custo de produção (Marouelli et al., 2012; Furquim & Abdala, 2019). Somado a isso, poucas são as pesquisas aplicadas ao manejo da irrigação do tomate, dificultando a eficiência e modernização do sistema produtivo.

A evapotranspiração (ET) é uma variável fundamental para a compreensão do ciclo hidrológico e do sistema solo-planta-atmosfera, uma vez que representa a perda de água a partir da superfície para a atmosfera (Djaman et al., 2018; Dinpashoh et al., 2019). No entanto, a determinação da evapotranspiração utilizando métodos diretos, como a lisimetria, tem alto custo operacional e difícil logística para a distribuição de equipamentos,

além de que seus resultados abrangem pequenas áreas, o que impulsiona o uso do sensoriamento remoto como uma ferramenta para a obtenção da evapotranspiração (Allen et al., 2007; Koksai et al., 2019).

A estimativa da distribuição espaço-temporal da evapotranspiração por meio do sensoriamento remoto em áreas agrícolas em larga escala pode permitir o planejamento e a tomada de decisão sobre o uso e manejo da água, em diferentes escalas espaciais, em regiões de difícil acesso, além de ser uma alternativa para regiões com pouca infraestrutura e escassez de dados, devido ao alto custo para a obtenção dos equipamentos (Laurin et al., 2018; Javadian et al., 2019; Wagle & Gowda, 2019). Alguns modelos de estimativa da evapotranspiração usando imagens de satélite vêm demonstrando bons resultados tanto em bacias hidrográficas e biomas, como em pequenas e médias áreas agrícolas (Numata et al., 2017; Jin et al., 2018).

Dentre estes algoritmos se destacam o SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithm for Land* proposto por Bastiaanssen et al. (1998), o seu sucessor METRIC - *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (Allen et al., 2007), e o modelo SAFER - *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (Teixeira, 2012). Estes se fundamentam no balanço de energia da superfície para produzir a distribuição espacial da evapotranspiração em diversas escalas. Entretanto, cada modelo utiliza diferentes parâmetros, calibrados específicos para determinadas condições, fazendo com que a seleção do algoritmo é dependente de uma conjuntura de fatores (Xiang et al., 2020).

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo:

a. Avaliar o desempenho dos algoritmos *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) e *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) na estimativa da evapotranspiração atual (ET_a) do tomateiro industrial irrigado por pivô central na região centro-sul de Goiás.

b. Analisar o uso da água de irrigação na produção de tomate para processamento industrial irrigada por pivô central, em regiões produtoras de Goiás.

1.1 REFERÊNCIAS

- 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. 4, p. 380-394, 2007.
- BASÍLIO, E. E.; GOLYSNKI, A.; GOLYNSKI, A. A.; SILVA, C. J.; OLIVEIRA, D. S.; DIAS, R. F. Intervalos de irrigação no cultivo de tomateiro para processamento. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 4, p. 676-692, 2019.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal Hydrology**, Amsterdam, v. 212, n. 1, p. 198-212, 1998.
- DINPASHOH, Y.; JAHANBAKHSI-ASL, S.; RASOULI, A. A.; FOROUGHI, M.; SINGH, V. P. Impact of climate change on potential evapotranspiration (case study: west and NW of Iran). **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 136, n. 2, p. 185-201, 2019.
- DJAMAN, K.; KOUDAHE, K.; LOMBARD, K.; O'NEIL, M. Sum of hourly vs. Daily Penman-Monteith grass-reference evapotranspiration under semiarid and arid climate. **Irrigation and Drainage Systems Engineering**, Milan, v. 7, n. 1, p. 1-6, 2018.
- FRANCA, R. J. F.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; CAMPECHE, L. F. S. M. Produtividade do tomate cereja em ambiente protegido e céu aberto em função das lâminas e intermitências de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 2, p. 1364-1370, 2017.
- FURQUIM, M. G. D.; ABDALA, K. O. Sustentabilidade e expansão da agricultura irrigada: um olhar para o setor no estado de Goiás. **Natural Resources**, Aracaju, v. 9, n. 1, p. 47-56, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. IBGE, 2019. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistemático_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/Ispa_201506.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistemático_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/Ispa_201506.pdf)>. Acesso em: 22 ago. 2020.
- JAVADIAN, M.; BEHRANGI, A.; GHOLIZADEH, M.; TAJRISHY, M. METRIC and WaPOR Estimates of Evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: Comparative Analysis and Composite Assessment. **Water**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1647-1667, 2019.
- JIN, Y.; HE, R.; MARINO, G.; WHITING, M.; KENT, E.; SANDEN, B. L.; CULUMBER, M.; FERGUSON, L.; LITTLE, C.; GRATTAN, S.; THA PAW U, K.; LAGOS, L. O.; SNYDER, R. L.; ZACCARIA, D. Spatially variable evapotranspiration over salt affected pistachio orchards analyzed with satellite remote sensing estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 262, n. 15, p. 178-191, 2018.

- KOKSAL, E. S.; ARTIK, C.; TASAN, M. Crop Evapotranspiration Estimations of Red Pepper Using Field Level Remote Sensing Data and Energy Balance. **Polish Journal Environmental Studies**, Varsóvia, v. 28, n. 1, p. 165-175, 2019.
- LAURIN, G. V.; BELLI, C.; BIANCONI, R.; LARANCI, P.; PAPALE, D. Early mapping of industrial tomato in Central and Southern Italy with Sentinel 2, aerial and RapidEye additional data. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 156, n. 3, p. 396-407, 2018.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; SILVA, W. L. C. **Irrigação do tomateiro para processamento**. Brasília: Embrapa Hortaliças, Circular técnica 102. p. 24, 2012.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Irrigação por gotejamento do tomateiro industrial durante o estágio de frutificação, na região do cerrado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 3, p. 342-346, 2006.
- MELO, P. C. T.; VILELA, N. J. Desafios e perspectivas para a cadeia brasileira do tomate para processamento industrial. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 1, p. 154-157, 2005.
- MOURA, L. E.; GOLYNSKI, A. Critical points of industrial tomato from field to processing. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 521-525, 2018.
- NUMATA, I.; KHAND, K.; KJAERGAARD, J.; COCHRANE, M. A.; SILVA, S. S. Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. **Remote Sensing**, Basel, v. 9, n. 1, p. 46, 2017.
- PEIXOTO, J. V. M.; SILVA NETO, C. M.; CAMPOS, L. F. C.; DOURADO, W. S.; NOGUEIRA, A. P. P.; NASCIMENTO, A. R. Industrial tomato lines: morphological properties and productivity. **Genetics and Molecular Research**, Cambridge, v. 16, n. 2, p. 1-15, 2017.
- SILVA, C. J.; PONTES, N. C.; GOLYNSKI, A.; BRAGA, M. B.; QUEZADO-DUVAL, A. M.; SILVA, N. E. P. Performance of processing tomatoes under different supply levels of crop evapotranspiration. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 299-305, 2018.
- 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; p. 154-157, 2012.
- WAGLE, P.; GOWDA, P. H. Editorial for the Special Issue “Remote Sensing of Evapotranspiration (ET)”. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 18, p. 2146-2153, 2019.
- WORLD PROCESSING TOMATO COUNCIL - WPTC. **World production estimate of tomatoes for processing (in 1000 metric tonnes)**. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.wptc.to/pdf/releases/WPTC%20World%20Production%20estimate%20as%20of%2027%20October%202016.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2020.

XIANG, K.; LI, Y.; HORTON, R.; FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 232, 106043, 2020.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET)

O termo evapotranspiração foi sugerido por Thornthwaite & Wilm (1944) e se refere à transferência de água a partir do solo, superfícies livres (evaporação) e da vegetação (transpiração) para a atmosfera, sendo o segundo maior componente hídrico (após a precipitação) no sistema solo-planta-atmosfera. Este processo possibilita o retorno ao ciclo hidrológico de mais da metade do volume de água precipitado na superfície da terra (Allen et al., 1998; Koksal et al., 2019).

A determinação e a compreensão do comportamento da ET, de acordo com Anderson et al. (2012), é uma ferramenta importante no estudo das mudanças climáticas, desastres naturais (inundações e secas), projeção de efeitos a longo prazo das mudanças de uso e cobertura da terra, uma vez que a evapotranspiração se mostra sensível às variações na precipitação, temperatura e balanço de energia. Ao entender a ET, podemos estabelecer a necessidade hídrica da cultura, promovendo o uso racional dos recursos hídricos por meio do manejo da irrigação (Jamshidi et al., 2019; Khand et al., 2019; McCabe et al., 2019), contribuindo para a regulamentação do uso da água, planejamento, monitoramento e avaliação do sistema de irrigação e drenagem (Taghvaeian et al., 2018).

A evapotranspiração tem participação relevante em estudos multidisciplinares como hidrologia (Oliveira et al., 2018; Ramírez-Cuesta et al., 2019), meteorologia (Anderson et al., 2012; He et al., 2019), ecologia urbana (Wang et al., 2016) e nas ciências agrícolas (Xiang et al., 2020; Yama et al., 2020). Estando relacionada com o balanço de entrada e saída de água no sistema, a ET condiciona o crescimento, desenvolvimento e à produção de biomassa (Wagle & Gowda, 2019). Assim, sua quantificação é essencial para o gerenciamento e aumento da produtividade da agricultura irrigada (Çetin & Köksal, 2018; Filgueiras et al., 2019a).

A estimativa da evapotranspiração é considerada um processo dinâmico, complexo e não linear, sendo dependente de parâmetros meteorológicos, como a radiação

solar (que fornece energia para o calor latente), umidade do ar (que regula a pressão do vapor), temperatura do ar (que regula o fluxo de calor sensível), velocidade do vento (que controla a remoção do vapor) e pelas características e condições do solo e da vegetação (Allen et al., 1998; Xiang et al., 2020).

Existem várias classificações para a evapotranspiração, mas segundo o boletim número 56 da FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO 56), organizado por Allen et al. (1998), se classificam em:

- Evapotranspiração de referência ou potencial (ET_o) - é a evapotranspiração de uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica nem nutricional, com altura média de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência de superfície de 70 s m^{-1} , atendendo as condições pré-determinadas pelo método de Penman-Monteith.

- Evapotranspiração potencial de cultura (ET_c) - é a evapotranspiração de uma determinada cultura quando há ótimas condições de umidade, sanidade e nutriente no solo, alcançando a produção máxima. Para relacionar ET_c e ET_o , utiliza-se o coeficiente de cultura (K_c) que varia ao longo do ciclo da cultura, sendo $ET_c = K_c \times ET_o$.

- Evapotranspiração real de cultura (ET_r) - é a evapotranspiração da cultura em condições adversas, reais; como em caso de baixa fertilidade do solo, presença de pragas e doenças, impedindo a máxima produção da cultura, sendo sempre menor ou igual à evapotranspiração potencial. Para sua estimativa inclui além do K_c o coeficiente de umidade do solo (K_s) que representa a influência do estresse hídrico, e a influência dos outros estresses e limitações ambientais.

Consistindo em um fenômeno complexo, diversos métodos foram desenvolvidos para quantificar e/ou estimar a evapotranspiração de referência. A ET_o pode ser medida ou estimada, de forma direta ou indireta sobre uma superfície homogênea usando: Tanque Classe A, lisimetria, método de covariância de vórtices turbulentos, chamado também de Eddy-covariance, razão de Bowen, balanço de água no solo e estimativas matemáticas, empíricas, com base na transferência de massa, no resíduo do balanço de energia e dados meteorológicos (Hargreaves & Samani, 1985; Allen et al., 1998; Liu et al., 2013; Bhattarai et al., 2017; Ferreira et al., 2019).

A equação mais utilizada para a estimativa da ET_o é a de Penman-Monteith - 56 (PM-56), recomendado pela Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) das Nações Unidas (Allen et al., 1998). O método PM-56 (Equação 1) é baseado em fatores

aerodinâmicos e termodinâmicos, mostrando-se um método completo, preciso e com melhor desempenho em relação a outras equações empíricas (Fan et al., 2019).

$$ET_0 = \frac{0,408 S(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{S + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

em que: ET_0 é a evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ; R_n é a radiação líquida na superfície, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; G é o fluxo de calor do solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; T é a temperatura média do ar, $^{\circ}\text{C}$; U_2 é a velocidade do vento a uma altura de 2 m, m s^{-1} ; e_s é a pressão do vapor de saturação, em kPa; e_a é a pressão de vapor real, em kPa; S é o declive da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; e γ é o coeficiente psicrométrica, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

O método do balanço de água no solo determina a ET_c baseado no princípio da conservação da massa da água em um volume de solo (Libardi, 2012). Este método baseia-se na quantificação da variação do armazenamento (entradas e saídas) de água em um determinado volume de solo (delimitada pela superfície do solo e pela profundidade efetiva da raiz) em um dado intervalo de tempo, determinando a dinâmica da exigência hídrica da cultura agrícola (Almeida et al., 2018; Jardim et al., 2019; Lima, 2020).

A equação de balanço de água no solo pode ser assim escrita de acordo com Libardi (2012) como (Equação 2):

$$\Delta ARM = P + I - D + AC \pm ES - ET \quad (2)$$

em que: ΔARM é a variação de armazenamento de água no perfil do solo, mm; P é a precipitação pluvial, mm; I é a irrigação, mm; D é a drenagem interna, mm; AC é a ascensão capilar, mm; ES é o escoamento superficial, mm; e ET é a evapotranspiração, mm.

Os valores de fluxo de entrada na Equação 2 são considerados no cálculo com o sinal positivo e os de fluxo de saída com o sinal negativo, se a quantidade de entrada de água for maior que a quantidade de saída no decorrer do mesmo período, o saldo será positivo e, caso contrário, será negativo (Libardi, 2012). Na literatura encontram-se estudos mostrando bons resultados na determinação da ET_c pelo método do balanço hídrico do solo, como em laranja (Almeida et al., 2018), cana-de-açúcar (Brito et al., 2009), palma-sorgo (Alves et al., 2019; Jardim et al., 2019), milho (Silva et al., 2020), trigo (Zhang et al., 2016) e melão (Libardi et al., 2015).

No entanto, alguns desses métodos de determinação e estimativa da evapotranspiração possuem limitações como alto custo e dificuldades de instalação e administração (Bhattarai et al., 2017; Xiang et al., 2020). Além do que a evapotranspiração é variável no tempo e no espaço (devido as variabilidades climatológicas, do solo e vegetação), desse modo estes métodos só podem monitorar a evapotranspiração para uma área específica de interesse devido heterogeneidade natural, não fornecendo distribuição espacial em escalas regionais (Allen et al., 2011b; Khand et al., 2017).

2.2 BALANÇO DE ENERGIA

O balanço de energia ou saldo de energia corresponde ao cálculo das interações dos diversos tipos de energia com a superfície e a atmosfera terrestre (Figura 2.1). Está relacionada com a energia transportada para a atmosfera por convecção, chamada de fluxo de calor sensível para o ar (H), a quantidade de energia utilizada para o aquecimento e transferência para os níveis inferiores do solo, chamada de fluxo de calor sensível no solo (G), ao fluxo de calor latente de evapotranspiração (LE), que é a energia transportada para a atmosfera devido a ascensão do vapor d'água emitido por evaporação ou evapotranspiração, ao saldo de radiação (R_n) que é a quantidade de radiação eletromagnética disponível na superfície para ser convertida em outras formas de energia, e a fotossíntese (F) (Pereira et al., 2002).

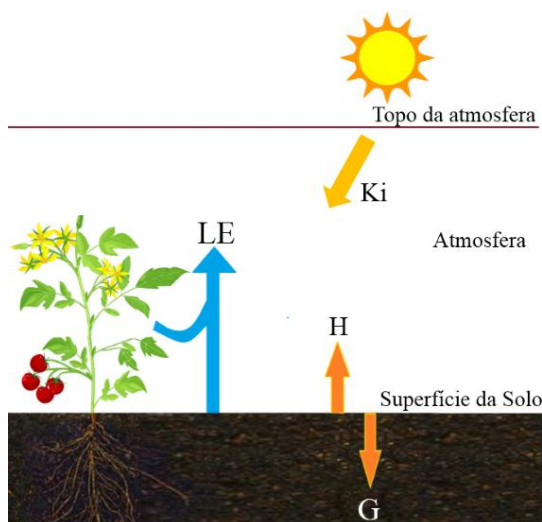


Figura 2.1 Balanço energético entre a superfície e a atmosfera na cultura do tomate. LE é o fluxo de calor latente; K_i é a irradiância solar incidente; H é o fluxo de calor sensível no ar; G é o fluxo de calor sensível no solo.

O balanço de energia pode ser expresso pela Equação 3, em que todos os componentes são expressos em razão da densidade de fluxo de energia ($W m^{-2}$).

$$LE = R_n - G - H - F \quad (3)$$

em que: R_n é o saldo de radiação; LE é o fluxo de calor latente; G é o fluxo de calor no solo; H é o fluxo de calor sensível no ar e F é a fotossíntese.

Neste cômputo a fotossíntese é desconsiderada devido ao seu aproveitamento energético ser inferior a 3%. O saldo de radiação é expresso pelo fluxo de radiações que incidem, refletem e são emitidas à superfície da Terra, sendo composto pelo balanço de radiação de ondas curtas - BOC (radiação solar incidente na superfície e a radiação solar que é refletida pela superfície), e pelo balanço de radiação de ondas longas - BOL (radiação emitida pela atmosfera e pela superfície) (Pereira et al., 2002; Liou & Kar, 2014; Wu et al., 2017).

A quantidade de radiação absorvida, refletida e emitida pela Terra é dependente das condições biofísicas do local, como a localização geográfica (latitude, longitude, declividade do terreno), estação do ano, hora do dia, clima, superfície vegetada e tipo de solo, assim, a intervenção de cada fator varia no cálculo do balanço de radiação (Pereira et al., 2002; Kjaersgaard et al., 2007; Warren et al., 2014).

O balanço de energia pode ser determinado utilizando radiômetros que são utilizados em estações meteorológicas automáticas ou por estimativas com emprego de modelos matemáticos (Wu et al., 2017). Entretanto, esses métodos estimam o balanço de energia para áreas limitadas e com o advento das geotecnologias, a obtenção do saldo de energia em uma escala regional utilizando imagens de satélites, vem apresentando resultados favoráveis em diferentes regiões e uso do solo (Bastiaanssen et al., 1998; Warren et al., 2014; Oliveira et al., 2018).

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O uso do sensoriamento remoto (SR) para mapear a estrutura espacial e temporal da evapotranspiração vem se tornando uma ferramenta confiável em substituição aos

métodos tradicionais que possuem limitações para determinar a evapotranspiração em grandes áreas, com custo elevado de instalação e manutenção (Allen et al., 2011; Fuente-Sáiz et al., 2017). A evapotranspiração não pode ser medida diretamente por técnicas de sensoriamento remoto (sensores orbitais), contudo, pode ser estimada por conjuntos de fatores mensuráveis por SR, como aspectos radiativos, atmosféricos e vegetais. Visto que pode ser estimada a partir de algoritmos, que são modelos semi-empíricos que utilizam imagens obtidas de sensores como dados de entrada (Fisher et al., 2017).

Mapas da distribuição espaço-temporal da evapotranspiração obtida por meio do sensoriamento remoto têm possibilitado identificar áreas com déficit hídrico e estimar a produtividade de culturas (French et al., 2015; Petropoulos et al., 2018) em terrenos heterogêneos, considerando as diferentes características da superfície e a necessidade hídrica da cultura (Bastiaanssen, 2000; Ihuoma & Madramootoo, 2017). O uso do SR e de dados agrometeorológicos são uma alternativa viável para o gerenciamento de recursos hídricos, auxiliando no planejamento agrícola e na eficiência do manejo da irrigação, além de permitir uma ampla cobertura espacial e temporal, na escala desejada, a um custo relativamente baixo (Senay et al., 2016; Reyes-González et al., 2017).

Os algoritmos elaborados para a detecção remota da evapotranspiração necessitam que os sensores a bordo de satélites capturem informações emitidas da superfície e em relação ao espectro eletromagnético do infravermelho térmico (Filgueiras et al., 2019b). Os elementos das bandas do visível e do infravermelho próximo e infravermelho térmico podem ser convertidos em variáveis de superfície terrestre e atmosférica, como temperatura da superfície, emissividade, albedo de superfície e índices de vegetação (Fuente-Sáiz et al., 2017).

Essas informações não apenas detectam o balanço de energia na superfície, mas também, quando corrigidas e livres de nuvens (pois reduzem a precisão dos resultados), podem captar fatores de estresses na vegetação, inerentes, principalmente, à evapotranspiração (Javadian et al., 2019; McCabe et al., 2019; Wagle & Gowda, 2019). O déficit hídrico em plantas é rapidamente representado por temperaturas elevadas do dossel e a temperatura da superfície é impactada pela condição de umidade do solo, refletindo assim no fluxo de energia da superfície na interpretação da superfície de interesse (Anderson et al., 2012; French et al., 2015).

Inúmeros modelos para a estimativa da evapotranspiração por SR têm se mostrado úteis para a produção agrícola (Numata et al., 2017; Koksai et al., 2019). Entre

esses algoritmos destacam-se: SEBAL – *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b), TSEB - *Two-Source Energy Balance* (Norman et al., 1995; Kustas & Norman, 1999), SEBS - *Surface Energy System Balance* (Su, 2002), METRIC – *Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration* (Allen et al., 2007, 2007a), ALEXI - *Atmosphere-Land Exchange Inverse* (Anderson et al., 2007), SAFER – *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (Teixeira, 2010; Teixeira et al., 2012), e SSEBop - *Operational Simplified Surface Energy Balance* (Senay et al., 2013).

Nas últimas décadas, houve uma tendência para o desenvolvimento de tecnologia de irrigação de precisão, e o uso de imagens de satélites como complemento na gestão de irrigação (Poças et al., 2014; Vuolo et al., 2015; Adeyemi et al., 2017; Alface et al., 2019). De acordo com Petropoulos et al. (2018) apesar das facilidades e progresso na estimativa da evapotranspiração por imagens de satélite, há desafios encontrados, como por exemplo, a disponibilidade de imagens de alta resolução em escalas espaciais e temporais que atendam o manejo da irrigação. Os mesmos autores relatam que algoritmos que estimam a evapotranspiração em áreas agrícolas e irrigadas precisam de mais estudos, pois a recuperação desta tem alta variação em relação ao nível da irrigação, às práticas de cultivos e ao tipo de cultura.

2.3.1 METRIC

O *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) é um modelo de processamento de imagem de satélite que possibilita estimar a evapotranspiração real em cada pixel a partir da radiação espectral obtida por meio de imagens do dossel das plantas em diferentes escalas espaciais, no momento da passagem do satélite, em função do resíduo do balanço de energia da superfície (Allen et al., 2007, 2007a, 2011). Este é derivado do modelo SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998a) e ambos são eficientes quando comparados aos métodos convencionais de estimativa da ET, em virtude de não ser necessário o uso de curvas do coeficiente de cultivo.

O modelo METRIC obtém a evapotranspiração real por parametrizações físicas bem estabelecidas, baseadas na equação do balanço de energia na superfície. O saldo de radiação é computado pela soma entre o balanço de radiação de onda curta e de onda longa, fazendo uso de imagens de satélites que propiciem informações da radiação eletromagnética

na região do visível, na região do infravermelho próximo e do infravermelho termal, e de informações da superfície, como a temperatura do ar e velocidade do vento (Bastiaanssen et al., 1998a; Allen et al., 2002).

Para a determinação do fluxo de calor sensível (H), um dos componentes do balanço de energia, o algoritmo METRIC utiliza um processo de calibração interna denominado de *Calibration Using Inverse Modeling at Extreme Conditions* (CIMEC), o qual seleciona pixels âncoras em condições extremas de temperatura e umidade para obtenção do gradiente de temperatura na interface superfície-atmosfera. Os pixels são referentes a região onde há solo exposto e com elevada temperatura, pixel quente, e região onde o solo está densamente coberto por vegetação e tem baixas temperaturas, pixel frio, podendo este ser representado por áreas agrícolas irrigadas (Bastiaanssen, 1998, 1998a; Tasumi et al., 2005). Para essa calibração interna, com gradiente de temperatura superficial em condições extremas, esses pixels (quente e frio) podem ser selecionados manualmente ou automaticamente (Allen et al., 2013; Bhattarai et al., 2017; Jaafar & Ahmad, 2020).

O modelo METRIC tem a vantagem de utilizar a evapotranspiração de referência, obtidos a partir de dados meteorológicos, no processo de calibração do fluxo de calor sensível e na extrapolação de valores instantâneos em diários. A utilização da ET_o para estimar a ET_a nos pontos de calibração de pixel frio, absorve os erros provenientes de R_n e G , eliminando a necessidade correções atmosféricas refinada da temperatura da superfície e do albedo (Allen et al., 2007a).

O METRIC foi avaliado utilizando a evapotranspiração obtida por lisimetria e outros métodos empíricos em diferentes regiões dos Estados Unidos da América com o objetivo de otimizar o uso da água, principalmente, nos direitos aos recursos hídricos, gestão e uniformidade da irrigação em diferentes usos do solo. A estimativa da evapotranspiração pelo METRIC obteve erros entre 1 a 4% e o desvio padrão entre 13 a 20% (Allen et al., 2005, 2007b).

Estudos demonstraram bons resultados na utilização do modelo METRIC para estimar e mapear a evapotranspiração em diferente uso do solo (Numata et al., 2017; Baeumler et al., 2019; Nema et al., 2020), em diferentes regiões do mundo (Madugundu et al., 2017; Spiliotopoulos et al., 2017), utilizando imagens do satélite Landsat (Jin et al., 2018; Singh et al., 2020), do sensor MODIS (Javadian et al., 2019; Bhattarai & Liu, 2019) e do sentinel (Guzinski et al., 2020). Além de apresentar boa correlação com a evapotranspiração

determinada por lisímetro de pesagem (Allen et al., 2007b; Hashem et al., 2020), razão de Bowen (Carrasco-Benavides et al., 2014) e atmômetro (Reyes-González et al., 2017, 2019).

Em áreas de produção agrícola de cana-de-açúcar (Zhang et al., 2015), pistache (Jin et al., 2018), oliveiras (Poça et al., 2014; Ramírez-Cuesta et al., 2019), algodão (French et al., 2015), milho (Khand et al., 2017; Baeumler et al., 2019) e sorgo (Lima et al., 2020) o METRIC também tem demonstrado eficiência quanto à estimativa da ET.

Reyes-González et al. (2019), ao estimarem a evapotranspiração da cultura do milho com o modelo METRIC, comparando com o atmômetro combinado com coeficiente da cultura da literatura e medida *in situ*, os resultados revelaram boa concordância, com alto coeficiente de determinação ($r^2 = 0,89$) e baixa raiz quadrada do erro médio - RMSE (0,71 mm dia⁻¹). Os mesmos autores observaram que a ET_a estimada para a cultura do milho foram superiores aos valores de ET_a estimados por atmômetro.

Fuente-Sáiz et al. (2017) mostram que o modelo METRIC pode ser utilizado como uma ferramenta eficaz para simular a variabilidade espacial e temporal dos componentes do balanço de energia em pomar de maçã. Xue et al. (2020) analisando modelos que estimam a evapotranspiração com base no balanço de energia, nas culturas de amêndoas, tomate para processamento e milho na Califórnia e comparando-a com o radiação líquida obtida *in situ*, concluíram que os modelos METRIC e SEBAL subestimam a evapotranspiração no início do ciclo do tomate (baixa cobertura vegetal), entretanto, concluíram que estes apresentam boa aplicabilidade no manejo da irrigação das culturas analisada, principalmente, na fase de maior demanda hídrica da cultura.

Lima et al. (2020) certificaram que o METRIC pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração na cultura do sorgo em condições semiáridas. Os autores correlacionaram a evapotranspiração obtida pelo METRIC com dados de lisímetro e obtiveram valores de RMSE de 0,8 mm dia⁻¹ para a evapotranspiração real.

2.3.2 SAFER

O termo *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) foi criado no ano de 2012 por Teixeira et al. (2012), em que anteriormente pode ser encontrado na literatura como Teixeira (2010). Este modelo é um algoritmo simplificado que tem apresentado bons resultados na estimativa da evapotranspiração em larga escala para as

condições brasileiras, sendo baseado na modelagem da razão da evapotranspiração atual e na de referência, calculada pelo método de Penman-Monteith FAO (Teixeira, 2010; Teixeira, 2012; Teixeira et al., 2013; Teixeira et al., 2017).

A sua estrutura teórica e aplicação requer parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto, juntamente com dados de estações meteorológicas, podendo ser aplicado em diversos ecossistemas (Teixeira et al., 2013; Franco et al., 2016). A sua relativa simplicidade também possibilita estimar a evapotranspiração sem o uso da banda termal (Teixeira et al., 2016), além de não exigir a seleção de pixels frio e quente como alguns algoritmos já consolidados.

Teixeira (2012) analisou a evapotranspiração com base no algoritmo SAFER em larga escala na região do semiárido brasileiro em áreas predominantes de caatinga e cultivo de frutíferas irrigadas, com imagens do satélite Landsat, em que os resultados mostraram concordância com medidas de balanço de energia em campo. Sales et al. (2017) ao estimarem a evapotranspiração atual na cultura do tomateiro industrial, utilizando o SAFER em Goiás, observaram que os valores de ET_a e K_c estimados com o SAFER apresentaram significativa correlação com métodos da FAO e Embrapa, demonstrando ser um algoritmo recomendado para a estimativa da evapotranspiração real da cultura.

Lima et al. (2019) ao correlacionar ET_a obtida pelo modelo SAFER e o modelo FAO 56 em áreas de produção de feijão no oeste da Bahia, notaram um coeficiente de determinação igual a 0,73, evidenciando o potencial desse algoritmo no auxílio ao produtor na gestão dos recursos hídricos utilizados na irrigação. Santos et al. (2020) relataram que o uso do modelo SAFER é uma alternativa para identificar a variação espacial e temporal da evapotranspiração na cultura do milho na região de Luís Eduardo Magalhães - BA, auxiliando no manejo da água em grandes áreas. Já Souza et al. (2020) e Mussi et al. (2020), com o modelo SAFER e utilizando imagens da Landsat 8 para estimar a evapotranspiração na cultura da cana-de-açúcar, mostraram que este pode estimar a evapotranspiração real da cultura, tanto em área de sequeiro como em sistemas de irrigação.

Na Tabela 2.1 estão as aplicações abreviadas dos modelos METRIC e SAFER utilizando imagens do satélite Landsat.

Tabela 2.1 Aplicações dos modelos METRIC e SAFER para a estimativa da evapotranspiração utilizando imagens do satélite Landsat.

Autor (es)	Modelo	Área de estudo	Uso do solo principal	Validação
Allen et al., 2007b	METRIC	Califórnia e Novo México - US	Áreas irrigadas	Erro = 4% área irrigadas. Erro = 1% beterraba irrigada
Reyes-Gonzáles et al., 2017	METRIC	Dakota do Sul - US	Milho	$R^2 = 0,87$ $d = 0,84$ RMSE = 0,65
Numata et al., 2017	METRIC	Rondônia - BR	Floresta amazônica	Estação Seca, $R^2 > 0,70$ Estação Chuvosa, $R^2 = 0,67$
Oliveira et al., 2018	METRIC	Cerrado Brasileiro	Cana-de-açúcar, cerrado e cerrado lenhos	$R^2 > 0,88$ RMSE < 0,87
Reyes-Gonzáles et al., 2019	METRIC	Dakota do Sul - US	Milho	$R^2 = 0,89$ RMSE = 0,71
Baeumler et al., 2019	METRIC	Minnesota - US	Milho, soja	Soja, $R^2 = 0,77$ Milho, $R^2 > 0,95$
Hashem et al., 2020	METRIC	Texas - US	Diversas culturas agrícolas	Sequeiro, $R^2 = 0,62$ Irigado, $R^2 = 0,65$
Xue et al., 2020	METRIC SEBAL SEBS	Califórnia - US	Amêndoas, tomate industrial, milho	Sequência de desempenho: SEBS > SEBAL > METRIC
Sales et al., 2017	SAFER	Goiás - BR	Tomate para processamento industrial	$R^2 = 0,97$
Lima et al., 2019	SAFER	Bahia - BR	Feijão	$R^2 = 0,73$ RMSE = 1,45 MAE = 1,22
Althoff et al., 2019	SAFER	Bahia - BR	Milho	$R^2 = 0,96$ RMSE = 0,50 MAE = 0,40
Souza et al., 2020	SAFER	Goiás - BR	Cana-de-açúcar	$R^2 > 0,90$
Venancio et al., 2020	SAFER	Bahia - BR	Soja	$d > 0,83$ RMSE < 1,02 MAE > 0,65
Silva et al., 2019a	SAFER x METRIC	Sudeste do Brasil	Silvicultura, cana-de-açúcar, pastagem, cerrado	METRIC apresentou melhor desempenho do que o SAFER
Teixeira et al., 2013	SAFER x SEBAL	Pernambuco - Bahia - BR	Caatinga e frutas irrigadas	SAFER apresentou melhor desempenho do que o SEBAL

2.4 CULTURA DO TOMATE

2.4.1 Tomate para processamento industrial

O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é uma das mais importantes hortaliças cultivadas no mundo, podendo ser cultivado em todas as regiões tropicais e subtropicais (Peixoto et al., 2017a). É uma dicotiledônea pertencente à ordem Tubiflorae, família Solanaceae, gênero *Solanum* (*Lycopersicon*), cuja espécie domesticada e amplamente cultivada é *Solanum lycopersicum* (Alvarenga, 2013).

O tomate é a segunda hortaliça mais cultivada no mundo, sendo originário do continente sul americano, mais especificadamente na região andina, desde o Equador, passando pela Colômbia, Peru, Bolívia, até o norte do Chile (Saavedra et al., 2017). A sua domesticação aconteceu no México, mais precisamente nas regiões de Puebla e Vera Cruz, por meio dos índios mexicanos antes da colonização espanhola, mas foram estes e os portugueses que difundiram o tomate pelo mundo (Alvarenga, 2013). No Brasil o cultivo do tomate para processamento industrial iniciou-se no estado de Pernambuco, depois São Paulo, e atualmente, está tendo grande expansão no Centro-Oeste (Vilela et al., 2012).

De acordo com Filgueira (2013), o tomateiro é uma solanácea herbácea, de caule flexível, que em seu desenvolvimento natural apresenta arquitetura semelhante a uma moita. O seu desenvolvimento vegetativo pode ser caracterizado pelo hábito de crescimento, determinado ou indeterminado. Para processamento industrial, tomateiros com crescimento determinado são os mais recomendados por possuir porte reduzido e por apresentarem maturação concentrada, possibilitando colheita única. As cultivares de tomate empregadas para o processamento devem possuir características como elevado teor de ácido cítrico, maior firmeza, alta resistência ao transporte e a doenças, facilidade de remoção da pele dos frutos, coloração vermelha e uniforme, pH mais baixo e, principalmente, alto teor de sólidos solúveis, que está diretamente relacionada com o rendimento final do produto. Essas características são influenciadas por fatores como: densidade de plantio, época de cultivo, adubação, irrigação, temperatura e escolha da cultivar (Luz et al., 2016; Ferreira et al., 2017; Wu et al., 2018; Peixoto et al., 2018).

O fruto pode ser consumido *in natura* ou processado, por ser fonte de licopeno é um aliado na alimentação humana, prevenindo doenças, e patologias cardíacas (Breksa et al., 2015). Além de possuir baixo valor calórico, é rico em vitaminas (A, B1, B2, B5, C),

sacarose, frutose, lipídios, proteínas, fibras, minerais (fósforo, potássio, magnésio, zinco) e carotenoides (Chanforana et al., 2012; Luterotti et al., 2015).

As exigências edafoclimáticas do tomateiro, tais como a temperatura do ar e a disponibilidade de água no solo, variam de acordo com os estádios fenológicos da cultura (Jędrszczyk et al., 2016; Santos, 2019). A temperatura ideal da maioria das variedades de tomate situa-se entre 21°C a 24°C (Alvarenga, 2013). Os graus-dia acumulados no ciclo podem variar de 1495°C a 1728°C, dependendo da época de transplântio, híbrido, região e safra (Pathak & Stoddard, 2018; Bezerra, 2019). A necessidade hídrica do tomate para processamento industrial está entre 300 a 690 mm para a região do cerrado, variação essa que se deve a evapotranspiração e à eficiência do sistema de irrigação no período do cultivo (Silva et al., 2019; Basílio et al., 2019).

O ciclo do tomateiro pode ser dividido em quatro fases distintas (Figura 2.2). O primeiro estágio compreende o período que vai do transplântio até o pleno pegamento das mudas (início de novas brotações), fase essa que dura em torno de uma a duas semanas e é nomeado usualmente de estabelecimento inicial. O segundo estágio, vegetativo, abrange o período entre o pleno estabelecimento das mudas até o início do florescimento, com duração de cinco a seis semanas. O terceiro estágio, a frutificação, se prolonga até o início da maturação dos frutos e tem duração de cinco a seis semanas. E o quarto estágio, a maturação, com duração de três a quatro semanas, vai do início da maturação até a colheita (Clemente & Boiteux, 2012; Alvarenga, 2013). O entendimento das fases do tomateiro e as suas variações de acordo com a cultivar e as condições climáticas é essencial para o manejo da cultura e, principalmente, da irrigação.

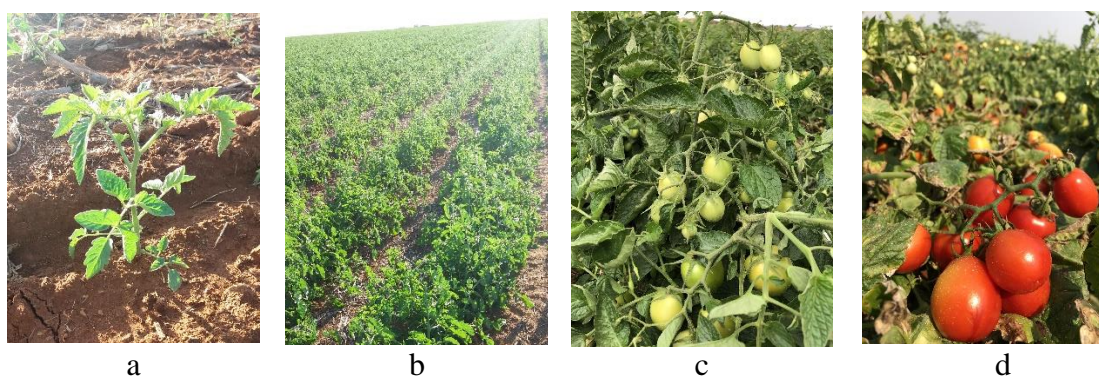


Figura 2.2 Estádios fenológicos do tomateiro industrial: a - Estabelecimento inicial; b - Vegetativo; c - Frutificação; d - Maturação.

2.4.2 Importância econômica do tomate para processamento industrial

A cadeia produtiva do tomate tem importância tanto social, ao promover empregos de forma direta e indireta para muitas famílias, quanto econômico, por apresentar-se como uma atividade economicamente viável, movimentando indústrias paralelas de insumos, maquinários agrícolas e equipamentos de irrigação (Assunção et al., 2013; Peixoto et al., 2017).

A produção brasileira de tomate para processamento industrial é a oitava maior do mundo (1,45 milhões toneladas), ficando atrás de países como os EUA (11,43 milhões toneladas), China (5,18 milhões toneladas), Itália (4,84 milhões de toneladas), e Espanha (2,95 milhões toneladas) (WPTC, 2020). Com 2,20% da produção mundial, o Brasil tem uma área cultivada de, aproximadamente, 15 mil hectares, com produtividade média de 71,9 t ha⁻¹ (FAO, 2017). A produção brasileira concentra-se nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste; compreendendo 97,70% do total (IBGE, 2019).

Em Goiás, a cultura do tomateiro industrial vem se expandindo desde a década de 90, devido às condições do solo, do clima e da topografia da região, além do uso de estratégias e tecnologias que favorecem o cultivo do tomateiro industrial (Marouelli et al., 2007; Silva Junior et al., 2015). O estado produz cerca de 978 mil toneladas de tomate com área colhida de aproximadamente 13 mil hectares, sendo considerado o maior produtor nacional de tomate para processamento industrial do país, com produtividade média de 81,5 t ha⁻¹ (IBGE, 2019).

Alguns dos principais municípios goianos produtores são: Cristalina, Itaberaí, Morrinhos, Piracanjuba, Vianópolis, Orizona, Vicentinópolis, Hidrolândia e Palmeiras de Goiás (IBGE, 2019). A migração da produção de tomate para o centro-oeste devido às condições edafoclimáticas favoráveis e à alta produtividade, variando de 80 a 84 t ha⁻¹, atraíram olhares de produtores e indústrias de processamento, favorecendo assim a economia do estado (Silva Junior et al., 2015).

2.4.3 Irrigação na produção de tomate para processamento industrial

Em lugares em que o regime pluviométrico é irregular e há elevada taxa de evaporação, a reposição de água ao solo por meio da irrigação constitui um fator essencial para o aumento de produtividade e diminuição de riscos, influenciando na qualidade e quantidade

de frutos (Marouelli et al., 2012; Soares et al., 2013). Segundo a Instrução Normativa da Agrodefesa nº 6 de 14/06/2011, o transplante de tomate rasteiro só pode ocorrer entre os meses de fevereiro e junho em função de medidas fitossanitárias para o controle da mosca branca no estado de Goiás (Agrodefesa, 2011).

Desse modo, os cultivos são inteiramente irrigados, principalmente por pivô central em linhas simples ou duplas (Koetz et al., 2010; Bezerra, 2019; Santos, 2019). O uso da irrigação por aspersão pode proporcionar a sobrevivência e a dispersão de vários patógenos, principalmente fungos e bactérias, em razão da água ser aplicada sobre a parte aérea das plantas do tomate (Marouelli et al., 2011). Entretanto, em paralelo, pode reduzir a população de ácaros e de insetos-pragas, e alguns insetos transmissores de viroses, devido ao impacto das gotas nas folhas da planta, levando à remoção de ovos, larvas e pupas.

Neste âmbito, o manejo da irrigação é essencial para o sucesso no cultivo de tomate para processamento industrial, entretanto, este manejo é realizado de forma empírica, causando prejuízos aos produtores e aos recursos hídricos (Silva et al., 2018; Silva et al., 2019). Quando irrigado em excesso, resulta em menor eficiência do uso de água pelas plantas, reduzindo a produtividade e favorecendo o surgimento de doenças. Já a irrigação deficitária pode ser maléfica para o desenvolvimento da área foliar, produção de matéria seca e produção total e para as produções total e comercial do tomateiro (Marouelli et al., 2012; Viol et al., 2017; Basílio et al., 2019).

Há diversos manejos de irrigação indicados e utilizados para o cultivo do tomateiro na literatura (Rebouças Neto et al., 2017; Silva et al., 2019). O déficit de água durante o estágio de maturação favorece a concentração do conteúdo de sólidos solúveis em frutos de tomateiro industrial, sendo condicionada às características de cada híbrido (Koetz et al., 2010; Luz et al., 2016; Basílio et al., 2019). De acordo com Silva et al. (2019) o corte da irrigação antes da colheita de tomate para processamento industrial pode diminuir a incidência de frutos verdes, mas aumenta a incidência de frutos podres, diminuindo a produtividade.

Dependendo das condições do cultivo, o processamento de uma tonelada de tomate consome em média 61 m³ de água, sendo a maior parte utilizada na fase agrícola do ciclo da cultura. Analisando o impacto aos recursos hídricos para a produção do tomate para processamento industrial, o foco das novas pesquisas devem ser o uso racional da água, visando aumentar a eficiência do uso da água e aumentar a produtividade da cultura (Evangelou et al., 2016).

2.7 REFERÊNCIAS

- ADEYEMI, O.; GROVE, I.; PEETS, S.; NORTON, T. Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation. **Sustainability**, London, v. 9, n. 3, p. 353-382, 2017.
- AGÊNCIA GOIANA DE DEFESA AGROPECUÁRIA – AGRODEFESA. **Instrução Normativa AGRODEFESA nº 6 de 14/06/2011**. Disponível em: <<https://sidago.agrodefesa.go.gov.br/site/adicionaispropios/protocolo/arquivos/399786.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ALFACE, A. B.; PEREIRA, S. B.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F. Sugarcane spatial-temporal monitoring and crop coefficient estimation through NDVI. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 5, p. 330-335, 2019.
- ALLEN, R. G.; BURNETT, B.; KRAMBER, W.; KJAERGAARD, J.; KILLIC, A.; KELLY, C.; TREZZA, R. Automated calibration of the METRIC LANDSAT evapotranspiration process. **Journal of the American Water Resources Association**, Herdon, v. 49, n.3, p. 563-576, 2013.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 6, p. 899-920, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO**, Rome, v. 300, n. 9, 1998.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, n. 3-4, p. 251-268, 2005.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Applications. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, Miami, v. 133, n. 4, p. 395-406, 2007b.
- ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI, M. Surface energy balance algorithms for land: advance training and user's manual. Versin 1.0. **Waters Consulting-University of Idaho-WaterWatch**, v. 1, 2002.
- ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 25, n. 26, p. 4011-4027, 2011a.
- ALLEN, R.; 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. 4, p. 380-394, 2007a.

ALMEIDA, K. S. S. A.; PAZ, V. P. S.; SOUZA, L. S.; COELHO FILHO, M. A.; HOCES, E. H. Balanço de água em solo cultivado sob pomar adensado de laranja 'pêra' enxertada em diferentes porta-enxertos. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 2, p. 235-248, 2018.

ALTHOFF, F.; ALVINO, F. C. G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 35, n. 3, p. 670-678, 2019.

ALVARENGA, M. A. R. **Tomate**: produção em campo, casa de vegetação e hidroponia. Lavras: Editora Universitária de Lavras, 2. ed. Ver. e ampl. 2013. 455 p.

ALVES, C. P.; SILVA, T. G. F.; ALVES, H. K. M. N.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; CRUZ NETO, J. F.; SANTOS, J. P. A. S. Consórcio palma-sorgo sob lâminas de irrigação: balanço de água no solo e coeficientes da cultura. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 27, n. 2, p. 347-356, 2019.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MECIKALSKI, J. R.; OTKIN, J. A.; KUSTAS, W. P. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 112, n. 5, p. 1-17, 2007.

ANDERSON, M.; ALLEN, R.; MORSE, A.; KUSTAS, W. Use of Landsat imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 122, n. 7, p. 50-65, 2012.

ASSUNÇÃO, P. E. V.; SPINELLI, E. M. A.; CARDOSO, J. S. Caracterização da produção de tomate-industrial no município de Morrinhos/GO: da utilização de defensivos à vantagem dos contratos. **Teoria e Evidência Econômica**, Passo Fundo, v. 19, n. 40, p. 153-168, 2013.

BAEUMLER, N. W.; KJAERGAARD, J.; GUPTA, S. C. Evapotranspiration from Corn, Soybean, and Prairie Grasses using the METRIC Model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 111, n. 2, p. 770-780, 2019.

BASÍLIO, E. E.; GOLYSNKI, A.; GOLYSNKI, A. A.; SILVA, C. J.; OLIVEIRA, D. S.; DIAS, R. F. Intervalos de irrigação no cultivo de tomateiro para processamento. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 4, p. 676-692, 2019.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL - Based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 229, n. 1, p. 87-100, 2000.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. The surfasse energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 213, n. 4, p. 213-229, 1998b.

BEZERRA, R. S. **Épocas de cultivo, densidades de plantio e soma térmica de híbridos de tomate para processamento industrial**. 2019. 55 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

BHATTARAI, N.; LIU, T. LandMOD ET mapper: A new matlab-based graphical user interface (GUI) for automated implementation of SEBAL and METRIC models in thermal imagery. **Environmental Modelling and Software**, Oxford, v. 118, p. 76-82, 2019.

BHATTARAI, N.; QUACKENBUSH, L. J.; IM, J.; SHAW, S. B. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 196, n. 9, p. 178-192, 2017.

BREKSA, A. P.; ROBERTSON, L. D.; LABATE, J. A.; KING, B. A.; KING, D. E. Physicochemical and morphological analysis of ten tomato varieties identifies quality traits more readily manipulated through breeding and traditional selection methods. **Journal of Food Composition and Analysis**, San Diego, v. 42, n. 6, p. 16-25, 2015.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; GHIRBERTO, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 295-303, 2009.

CARRASCO-BENAVIDES, M.; ORTEGA-FARIAS, S.; LAGOS, L. O.; KLEISSL, J.; MORALES-SALINAS, L.; KILIC, A. Parameterization of the satellite-based model (METRIC) for the estimation of instantaneous surface energy balance components over a drip-irrigated vineyard. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, n. 11, p. 11342-11371, 2014.

ÇETIN, S.; KÖKSAL, E. S. Potential use of remote sensing techniques in evapotranspiration estimates at watershed level. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 190, n. 10, p. 601, 2018.

CHANFORANA, C.; LOONISA, M.; MORAA, N.; CARIS-VEYRATA, C.; DUFOUR, C. The impact of industrial processing on health-beneficial tomato microconstituents. **Food Chemistry**, London, v. 134, n. 4, p. 1786-1795, 2012.

CLEMENTE, F. M. V. T.; BOITEUX, L. **Produção de Tomate para processamento industrial**. Brasília: Embrapa. 2012. p. 344.

EVANGELOU, E.; TSADILAS, C.; TSERLIKAKIS, N.; TSITOURAS, A.; KYRITSIS, A.; Water Footprint of Industrial Tomato Cultivations in the Pinios River Basin: Soil Properties Interactions. **Water**, Basel, v. 8, n. 11, p. 1-13, 2016.

FAN, J.; MA, X.; WU, L.; ZHANG, F.; YU, X.; ZENG, W. Light gradient boosting machine: An efficient soft computing model for estimating daily reference evapotranspiration with local and external meteorological data. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 225, 105758, 2019.

FERREIRA, L. B.; CUNHA, F. F.; OLIVEIRA, R. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Estimation of reference evapotranspiration in Brazil with limited meteorological data using

ANN and SVM - A new approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 572, n. 5, p. 556-57, 2019.

FERREIRA, N. C.; VENDRUSCOLO, E. P.; SELEGUINI, A.; DOURADO, W. S.; BENETT, C. G. S.; NASCIMENTO, A. R. Crescimento, produção e qualidade de frutos de tomateiro em cultivo adensado com uso de paclobutrazol. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, Bogotá, v. 11, n. 1, p. 72-79, 2017.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo Manual de Olericultura**: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 194 p.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F. Sensitivity of evapotranspiration estimated by orbital images under influence of surface temperature, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, special issue, p. 23-32, 2019a.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; RIBEIRO, R. B.; VENANCIO, L. P.; SANTOS, R. A. Dynamics of actual crop evapotranspiration based in the comparative analysis of SEBAL and METRIC-EEFLUX. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 72-80, 2019b.

FISHER, J. B.; MELTON, F.; MIDDLETON, E.; HAIN, C.; ANDERSON, M.; ALLEN, R.; MCCABE, M. F.; HOOK, S.; BALDOCCHI, D.; TOWNSEND, P. A.; KILIC, A.; TU, K.; MIRALLES, D. D.; PERRET, J.; LAGOUARDE, J.; WALISER, D.; PURDY, A. J.; FRENCH, A.; SCHIMEL, D.; FAMIGLIETTI, J. S.; STEPHENS, G.; WOOD, E. F. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resources Research**, Washington, v. 53, n. 4, p. 2618-2626, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Water and climate chance**, FAOSTAT. **Database Results**. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/statistics/databases/en/>>. Acesso em: 10 out. 2020.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; COAGUILA, D. N.; NEALE, C. N. Water productivity mapping using Landsat 8 satellite together with weather stations. **Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology**, Madri, v. 9998, 99981H, 2016.

FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; THORP, K. R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 158, n. 1, p. 281-294, 2015.

FUENTE-SÁIZ, D.; ORTEGA-FARIÁS, S.; FONSECA, D.; ORTEGA-SALAZAR, S.; KILIC, A.; ALLEN, R. Calibration of METRIC Model to Estimate Energy Balance over a Drip-Irrigated Apple Orchard. **Remote Sensing**, Basel, v. 9, n. 7, p. 670, 2017.

GUZINSKI, R.; NIETO, H.; SANDHOLT, I.; KARAMITILIOS, G. Modelling High-Resolution Actual Evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 Data Fusion. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 9, p. 1433, 2020.

- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, Berrien, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- HASHEM, A. A.; ENGEL, B. A.; BRALTS, V. F.; MAREK, G. W.; MOORHEAD, J. E.; RASHAD, M.; RADWAN, S.; GOWDA, P. H. Landsat Hourly Evapotranspiration Flux Assessment Using Lysimeters for the Texas High Plains. **Water**, Basel, v. 12, n. 4, p. 1192, 2020.
- HE, M.; KIMBALL, J. S.; YI, Y.; RUNNING, S. W.; GUAN, K.; MORENO, A.; WU, X.; MANETA, M. Satellite data-driven modeling of field scale evapotranspiration in croplands using the MOD16 algorithm framework. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 230, 111201, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. IBGE, 2019. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/Ispa_201506.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/Ispa_201506.pdf)>. Acesso em: 22 ago. 2020.
- IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. Recent advances in crop water stress detection. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 141, p. 267-275, 2017.
- JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 238, 111034, 2020.
- JAMSHIDI, S.; ZAND-PARSA, S.; JAHROMI, M. N.; NIYOGI, D. Application of a Simple Landsat-MODIS Fusion Model to Estimate Evapotranspiration over a Heterogeneous Sparse Vegetation Region. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 7, p. 741, 2019.
- JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; ALVES, H. K. M. N.; ARAÚJO, J. F. N.; SILVA, G. I. N.; SILVA, J. O. N. Dinâmica da água no solo com cultivo de palma forrageira sob quatro sistemas de plantio. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 27, n. 2, p. 357-365, 2019.
- JAVADIAN, M.; BEHRANGI, A.; GHOLIZADEH, M.; TAJRISHY, M. METRIC and WaPOR estimates of evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: Comparative Analysis and Composite Assessment. **Water**, Basel, v. 11, n. 8, p. 1647, 2019.
- JĘDRSZCZYK, E.; SKOWERA, B.; GAWEDA, M.; LIBIK, A. The effect of temperature and precipitation conditions on the growth and development dynamics of five cultivars of processing tomato. **Journal of Horticultural Research**, Skierniewice, v. 24, n. 8, p. 63-72, 2016.
- JIN, Y.; HE, R.; MARINO, G.; WHITING, M.; KENT, E.; SANDEN, B. L.; CULUMBER, M.; FERGUSON, L.; LITTLE, C.; GRATTAN, S.; THAPAWU, K.; LAGOS, L. O.; SNYDER, R. L.; ZACCARIA, D. Spatially variable evapotranspiration

over salt affected pistachio orchards analyzed with satellite remote sensing estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 262, p. 178-191, 2018.

KHAND, K.; KJAERGAARD, J.; HAY, C.; JIA, X. Estimating Impacts of Agricultural Subsurface Drainage on Evapotranspiration Using the Landsat Imagery-Based METRIC Model. **Hydrology**, Fort Collins, v. 4, n. 49, p. 1-16, 2017.

KHAND, K.; TAGHVAEIAN, S.; GOWDA, P.; PAUL, G. A Modeling Framework for Deriving Daily Time Series of Evapotranspiration Maps Using a Surface Energy Balance Model. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 5, p. 508, 2019.

KJAERGAARD, J. H.; CUENCA, R. H.; PLAUBORG, F. L.; HANSEN, S. Long-term comparisons of net radiation calculation schemes. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 123, n. 3, p. 417-431, 2007.

KOETZ, M.; MASCA, M. G. C. C.; CARNEIRO, L. C.; RAGAGNIN, V. A.; SENA JÚNIOR, D. G.; GOMES FILHO, R. R. Caracterização agrônômica e °Brix em frutos de tomate industrial sob irrigação por gotejamento no sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 1, p. 14-22, 2010.

KOKSAL, E. S.; ARTIK, C.; TASAN, M. Crop Evapotranspiration Estimations of Red Pepper Using Field Level Remote Sensing Data and Energy Balance. **Polish Journal Environmental Studies**, Varsóvia, v. 28, n. 1, p. 165-175, 2019.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 94, n. 1, p. 13-29, 1999.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2ª edição, 352p, 2012.

LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; BRITO, A. S.; AMARO FILHO, J. Water balance components in covered and uncovered soil growing irrigated muskmelon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1322-1334, 2015.

LIMA, A. L. B.; FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; SANTOS, R. A.; VENANCIO, L. P. Biophysical Parameters and Actual Evapotranspiration of Bean Culture by Means of Remote Sensing. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 11, n. 13, p. 156-166, 2019.

LIMA, J. G. A.; SÁNCHEZ, J. M.; PIQUERAS, J. G.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; VIANA, P. C.; ALVES, A. S. Evapotranspiration of sorghum from the energy balance by METRIC and STSEB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 1, p. 24-30, 2020.

LIU, Y.; KAR, S. K. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms - A Review. **Energies**, Paris, v. 7, n. 5, p. 2821-2849, 2014.

- LIU, S. M.; XU, Z. W.; ZHU, Z. L.; JIA, Z. Z.; ZHU, M. J. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometer in the Hai River Basin, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 487, p. 24-38, 2013.
- LUTEROTTI, S.; BICANIC, D.; MARKOVI, K.; FRANKO, M. Carotenes in processed tomato after thermal treatment. **Food Control**, Guilford, v. 48, n. 4, p. 67-74, 2015.
- LUZ, J. M. Q.; BITTAR, C. A.; OLIVERIRA, R. C.; NASCIMENTO, A. R.; NOGUEIRA, A. P. O. Desempenho e divergência genética de genótipos de tomate para processamento industrial. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, p. 483-490. 2016.
- MADUGUNDU, R.; AL-GAADI, K. A.; TOLA, E.; HASSABALLA, A. A.; PATIL, V. C. Performance of the METRIC model in estimating evapotranspiration fluxes over an irrigated field in Saudi Arabia using Landsat-8 images. **Hydrology and Earth System Sciences**, Potsdam, v. 21, n. 12, p. 6135-6151, 2017.
- MAROUELLI, W. A.; MEDEIROS, M. A.; SOUZA, R. F.; RESENDE, F. V. Produção de tomateiro orgânico irrigado por aspersão e gotejamento, em cultivo solteiro e consorciado com coentro. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 429-434, 2011.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; SILVA, W. L. C. **Irrigação do tomateiro para processamento**. Brasília: Embrapa Hortaliças, Circular técnica 102. p. 24, 2012.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R.; MORETTI, C. L. **Efeito da época de suspensão da irrigação na produção e qualidade de frutos de tomate para processamento**. Embrapa, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 25. 18 p. 2007.
- MCCABE, M. F.; MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; FISHER, J. B. Advances in the Remote Sensing of Terrestrial Evaporation. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 9, p. 1138, 2019.
- MUSSI, R. F. M.; ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.; BATTISTI, R. Evapotranspiração da cana-de-açúcar estimada pelo algoritmo SAFER. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 263-278, 2020.
- NEMA, M. K.; THAKUR, H. P.; UPRETI, H.; JAIN, S. K.; MISHRA, P. K.; THAYYEN, R. J.; SINGH, P. K.; JAIN, S. K. Estimation of evapotranspiration in lesser Himalayas using remote sensing based surface energy balance algorithm. **Geocarto International**, Hong Kong, p. 1-19, 2020.
- NORMAN, J. M.; BECKER, F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 77, n. 3-4, p. 153-166, 1995.
- NUMATA, I.; KHAND, K.; KJAERGAARD, J.; COCHRANE, M. A.; SILVA, S. S. Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. **Remote Sensing**, Basel, v. 9, n. 1, p. 46, 2017.

OLIVEIRA, B. S.; MORAES, E. C.; CARRASCO-BENAVIDES, M.; BERTANI, G.; MATAVELI, G. A.V. Improved Albedo Estimates Implemented in the METRIC Model for Modeling Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration over Agricultural and Natural Areas in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, n. 8, p. 1181, 2018.

PATHAK, T. B.; STODDARD, C. S. Climate change effects on the processing tomato growing season in California using growing degree day model. **Modeling Earth Systems and Environment**, Cham, v. 4, n. 15, p. 765-775, 2018.

PEIXOTO, J. V. M.; CAMPOS, L. F. C.; MORAES, E. R.; CARDOSO, A. F.; LANA, R. M. Q.; NASCIMENTO, A. R. Characterization of processing tomato lines as the physiological and production characteristics. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 33, n. 4, p. 850-860, 2017.

PEIXOTO, J. V. M.; GARCIA, L. G. C.; NASCIMENTO, A. R.; MORAES, E. R.; FERREIRA, T. A. P. C.; FERNANDES, M. R.; PEREIRA, V. A. Post-harvest evaluation of tomato genotypes with dual purpose. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 38, n. 2, p. 255-262, 2018.

PEIXOTO, J. V. M.; MORAES, E. R.; PEIXOTO, J. L. M.; NASCIMENTO, A.R.; NEVES, J.G. Tomaticultura: Aspectos morfológicos e propriedades físico-químicas do fruto. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 19, n. 1, p. 108-131, 2017a.

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

PETROPOULOS, G. P.; SRIVASTAVA, P. K.; PILES, M.; PEARSON, S. Earth Observation-Based Operational Estimation of Soil Moisture and Evapotranspiration for Agricultural Crops in Support of Sustainable Water Management. **Sustainability**, London, v. 10, n. 1, p. 181-201, 2018.

POÇAS, I.; PAÇO, T. A.; CUNHA, M.; ANDRADE, J. A.; SILVESTRE, J.; SOUSA, A.; SANTOS, F. L.; PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms. **Biosystems engineering**, London, v. 128, p. 69-81, 2014.

RAMÍREZ-CUESTA, J. M.; ALLEN, R. G.; ZARCO-TEJADA, P. J.; KILIC, A.; SANTOS, C.; LORITE, I. J. Impact of the spatial resolution on the energy balance components on an open canopy olive orchard. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 74, n. 1, p. 88-102, 2019.

REBOUÇAS NETO, M. O.; AZEVEDO, B. M.; ARAÚJO, T. V. V.; VASCONCELOS, D. V.; FERNANDES, C. N. V. Irrigation frequency on economic performance and productivity of tomato in the coast of Ceará, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 4, p. 971 - 979, 2017.

REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; HAY, C.; AHIABLAME, L. Comparative Analysis of METRIC Model and Atmometer Methods for Estimating Actual Evapotranspiration. **International Journal of Agronomy**, London, 3632501, 2017.

REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; RETA-SÁNCHEZ, D.G.; SÁNCHEZ-DUARTE, J. I.; PRECIADO-RANGEL, P.; FORTIS-HERNÁNDEZ, M. Comparison of Leaf Area Index, Surface Temperature, and Actual Evapotranspiration Estimated Using the METRIC Model and In Situ Measurements. *Sensors*, New York, v. 19, n. 8, 1857, 2019.

SAAVEDRA, T. M.; FIGUEROA, G. A.; CAUIH, J. G. D. Origin and evolution of tomato production *Lycopersicon esculentum* in México. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 47, n. 3, e20160526, 2017.

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

SANTOS, H. L. **Uso da técnica de mineração de dados para estudo da influência de fatores meteorológicos sobre a produção de tomate para processamento industrial.** 2019. 36 f. Dissertação (Mestrado em Olericultura) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Morrinhos, 2019.

SANTOS, R. A.; DIVINCULA, J. S.; OLIVEIRA, K. R.; VENANCIO, L. P.; MISSIO, M. F.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. R.; ALEMAN, C. C. Remote sensing as a tool to determine biophysical parameters of irrigated seed corn crop. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 41, n. 2, p. 435-446, 2020.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. *Journal of the American Water Resources Association*, Herndon, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013.

SENAY, G. B.; FRIEDRICH, M.; SINGH, R. S.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 185, n. 3, p. 171-185, 2016.

SILVA JUNIOR, A. R.; RIBEIRO, W. M.; NASCIMENTO A. D. R.; SOUZA C. B. Cultivo do tomate industrial no Estado de Goiás: evolução das áreas de plantio e produção. *Conjuntura Econômica Goiana*, Goiânia, n. 34, p. 97-109, 2015.

SILVA, C. J.; FRIZZONE, J. A.; SILVA, C. A.; GOLYNSKI, A.; SILVA, L. F. M.; MEGGUER, C. A. Tomato yield as a function of water depths and irrigation suspension periods. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 23, n. 8, p. 591-597, 2019.

SILVA, C. J.; PONTES, N. C.; GOLYNSKI, A.; BRAGA, M. B.; QUEZADO-DUVAL, A. M.; SILVA, N. E. P. Performance of processing tomatoes under different supply levels of crop evapotranspiration. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 36, n. 3, p. 299-305, 2018.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Comparison of SAFER and METRIC-BASED actual evapotranspiration models in a subtropical area of

Brazil. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial Inovagri – notas técnicas, v. 1, n. 1, p. 48-55, 2019a.

SILVA, G. S. F.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; CARDOSO, M. J.; ARAÚJO NETO, R. B. Soil water dynamics and yield in maize and *Brachiaria ruziziensis* intercropping. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 50, e59809, 2020.

SINGH, R. P.; PARAMANIK, S.; BHATTACHARYA, B. K.; BEHERA, M. D. Modelling of evapotranspiration using land surface energy balance and thermal infrared remote sensing. **Tropical Ecology**, Varanasi, v. 61, n. 3, p. 42-50, 2020.

SOARES, L. A. A.; BRITO, M. E. B.; SILVA, E. C. B.; SÁ, F. V. S.; ARAÚJO, T. T. Componentes de produção do tomateiro sob lâminas de irrigação nas fases fenológicas. **Revista Verde**, Mossoró, v. 8, n. 3, p. 84-90, 2013.

SOUZA, J. M. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; MESQUITA, M. Validação do modelo SAFER na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 247-262, 2020.

SPILIOTOPOULOS, M.; HOLDEN, N. M. H.; LOUKAS, A. Mapping Evapotranspiration Coefficients in a Temperate Maritime Climate Using the METRIC Model and Landsat TM. **Water**, Basel, v. 9, n. 1, p. 23-38, 2017.

SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Science**, Munich, v. 6, n. 1, p. 85-99, 2002.

TAGHVAEIAN, S.; NEALE, C. M.; OSTERBERG, J. C.; SRITHARAN, S. I.; WATTS, D. R. Remote Sensing and GIS Techniques for Assessing Irrigation Performance: Case Study in Southern California. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 144, n. 6, 05018002, 2018.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L. Satellitebased energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 1, p. 94-109, 2005.

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, 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; p. 154-157, 2012.

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

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. 32 p. 2013. (Documentos, 99).

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. R.; FRANCO, R. A. M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, v. 11, n. 1, 2017.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. C. Sugarcane water productivity assessments in the São Paulo state - Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, Abingdon, v. 6, p. 84-95, 2016.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. **Report of the Committee on evapotranspiration and transpiration**, 1943-1944. Washington, D.C.: Transactions of the American Geophysical Union, v. 25, n. 5, p. 683-693, 1944.

VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F.; SANTOS, R. A.; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, R. C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application, **Plos one**, San Francisco, v. 15, n. 7, e0235620, 2020.

VILELA, N. J.; MELO, P. C. T.; BOITEUX, L. S.; CLEMENTE, F. M. V. T. 2012. **Perfil Socioeconômico da cadeia agroindustrial no Brasil**. IN: CLEMENTE, F. M. V. T.; BOITEUX, L. Produção de Tomate para processamento industrial. Brasília: Embrapa. 2012. p. 134.

VIOL, M. A.; CARVALHO, J. A.; LIMA, E. M. C.; REZENDE, F. C.; MATTOS, R. W. P.; RODRIGUES, J. L. M. Déficit hídrico e produção do tomate cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 1, p. 1244-1253, 2017.

VUOLO, F.; D'URSO, G.; MICHELE, C.; BIANCHI, B.; CUTTING, M. Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 147, n. 3, p. 82-95, 2015.

WAGLE, P.; GOWDA, P. H. Editorial for the Special Issue "Remote Sensing of Evapotranspiration (ET)". **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 18, 2146, 2019.

WANG, C.; YANG, J.; MYINT, S. W.; WANG, Z.H.; TONG, B. Empirical modeling and spatiotemporal patterns of urban evapotranspiration for the Phoenix metropolitan area, Arizona. **GISci. Remote Sensing**, Basel, v. 53, n. 6, p. 778-792, 2016.

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. D. 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. 1, p. 65-82, 2014.

WORLD PROCESSING TOMATO COUNCIL - WPTC. **World production estimate of tomatoes for processing (in 1000 metric tonnes)**. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.wptc.to/pdf/releases/WPTC%20World%20Production%20estimate%20as%20of%2027%20October%202016.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

WU, B.; LIU, S.; ZHU, W.; YAN, N.; XING, Q.; TAN, S. An Improved Approach for Estimating Daily Net Radiation over the Heihe River Basin. **Sensors**, New York, v. 17, n. 1, p. 86, 2017.

WU, B.; PATEL, B. K.; FEI, X.; JONES, O.; CAMPANELLA, O. H.; REUHS, B. L. Variations in physical-chemical properties of tomato suspensions from industrial processing. **LWT- Food Science and Technology**, West Lafayette, v. 93, n. 7, p. 281-286, 2018.

XIANG, K.; LI, Y.; HORTON, R.; FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 232, n. 3, 106043, 2020.

XUE, J.; BALI, K. M.; LIGHT, S.; HESSELS, T.; KISEKKA, I. Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration models against surface renewal in almonds, tomatoes and maize. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 238, 106228, 2020.

YAMA, S. S.; EKER, C.; NEGI, H. Evaluation of machine learning methods to predict soil moisture constants with different combinations of soil input data for calcareous soils in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 234, 106121, 2020.

ZHANG, D.; YAO, P.; NA, Z.; CAO, W.; ZHANG, S.; LI, Y. Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach. **Scientific Reports**, London, v. 6, 26856, 2016.

ZHANG, H.; ANDERSON, R. G.; WANG, D. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 180, n. 11, p. 143-154, 2015.

3 SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CULTURA DO TOMATE PARA PROCESSAMENTO INDUSTRIAL

RESUMO

A estimativa da evapotranspiração por sensoriamento remoto é uma ferramenta promissora para o manejo da irrigação, entretanto carece de mais estudos voltados para áreas agrícolas. Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar o desempenho dos algoritmos SAFER e METRIC na estimativa da evapotranspiração do tomateiro industrial irrigado no centro-sul goiano. O estudo foi realizado em nove áreas de produção de tomate para processamento industrial irrigado por pivô central em Goiás, durante o ano de 2018 e 2019. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS das órbitas/pontos 221/72 e 222/72, para estimativa da ET_a pelos modelos SAFER e METRIC comparando com a ET obtida pelos métodos da FAO, Embrapa e balanço hídrico do solo a partir de índices estatísticos. Os algoritmos analisados apresentaram variabilidade espacial e temporal da ET_a ao longo do ciclo da cultura do tomate para processamento industrial. A evapotranspiração máxima estimada pelo SAFER foi de $5,20 \text{ mm dia}^{-1}$ e pelo METRIC de $5,00 \text{ mm dia}^{-1}$. Os algoritmos apresentaram boa precisão quando comparados aos métodos padrões, principalmente, ao da Embrapa. Os EQM (erro quadrado médio) foram menores que $0,59 \text{ mm dia}^{-1}$ para o SAFER e menores que $0,73 \text{ mm dia}^{-1}$ para o METRIC. Nas fases vegetativa e de frutificação, a evapotranspiração estimada pelos modelos SAFER e METRIC apresentaram os menores valores de EMA (erro médio absoluto) de $0,24 \text{ mm dia}^{-1}$ em relação aos métodos padrões. O modelo SAFER proporcionou melhor correlação com os métodos padrões quando comparado com o METRIC, com coeficiente de correlação variando de 0,64 a 0,99. Desse modo, o uso de imagens de satélite junto aos algoritmos mostraram ser uma boa ferramenta na estimativa da evapotranspiração da cultura do tomate para processamento industrial na região de Goiás.

Palavra-chave: Geoprocessamento; Tomaticultura, Manejo da irrigação; Balanço de energia

ABSTRACT

The estimation of evapotranspiration by remote sensing is a promising tool for irrigation management, however there is a need for further studies focused on agricultural areas. In this context, the objective of the study was to evaluate the performance of the SAFER and METRIC algorithms in the estimation of the evapotranspiration of the irrigated processing tomato in the south-central region of Goiás. The study was carried out in nine processing tomato production areas irrigated by a central pivot in Goiás, during 2018 and 2019. Images from the Landsat 8 OLI/TIRS satellite of the orbits/point 221/72 and 222/72

were used to estimate the ET_a by the SAFER and METRIC models comparing with the ET obtained by the FAO, Embrapa methods and soil water balance from statistical indexes. The analyzed algorithms showed ET_a spatial and temporal variability throughout the processing tomato crop cycle. The maximum evapotranspiration estimated by SAFER was 5.20 mm day^{-1} and by METRIC of 5.00 mm day^{-1} . The algorithms showed good precision when compared to the standard methods, mainly to Embrapa. MSE (mean square error) were less than 0.59 mm day^{-1} for SAFER and less than 0.73 mm day^{-1} for METRIC. In the vegetative and fruiting phases, the evapotranspiration estimated by the SAFER and METRIC models presented the lowest values of MAE (mean absolute error) of 0.24 mm day^{-1} in relation to the standard methods. The SAFER model provided a better correlation with standard methods when compared to METRIC, with a correlation coefficient ranging from 0.64 to 0.99. Thus, the use of satellite images along with the algorithms proved to be a good tool in estimating the evapotranspiration of the processing tomato crop in the region of Goiás.

Key words: Geoprocessing; Tomaticulture; Irrigation management; Energy balance

3.1 INTRODUÇÃO

O tomate (*Solanum lycopersicum L.*) é a segunda hortaliça mais difundida e cultivada no mundo, ficando atrás apenas da batata. A cadeia produtiva do tomate para processamento industrial apresenta relevante importância no agronegócio brasileiro, sendo as principais regiões produtoras o Sudeste e o Centro-Oeste. O estado de Goiás é o maior produtor nacional, com produtividade média de $81,5 \text{ t ha}^{-1}$ (IBGE, 2017), enquanto a média nacional é de $71,9 \text{ t ha}^{-1}$ (FAO, 2017).

O período ideal para o cultivo do tomate para processamento industrial é entre os meses de março a outubro, época de baixa precipitação pluviométrica, pois proporciona menor incidências de doenças e, portanto, maior produtividade, sendo em sua maioria irrigada por sistema de pivô central (Marouelli et al., 2012). Desse modo, o uso da irrigação é indispensável para suprir as necessidades hídricas e garantir o desenvolvimento da cultura. O uso de pivô central possibilita a solubilização e a disponibilização dos nutrientes do solo, favorecendo a qualidade final do fruto. Entretanto, o manejo da irrigação errôneo pode acarretar o surgimento de doenças, prejudicar a produtividade, qualidade de frutos e alterar a gestão dos recursos hídricos (Koetz et al., 2010; Marouelli et al., 2011; Silva et al., 2019a).

A estimativa da necessidade hídrica da planta por meio do monitoramento meteorológico fazendo uso da evapotranspiração (ET) e dos coeficientes da cultura (K_c) é um dos métodos de manejo da irrigação mais tradicionais e comumente utilizado. Entretanto, as dificuldades de instalação e administração que alguns métodos de determinação da evapotranspiração denotam, juntamente com as incertezas por essa variável ser dependente

das características do solo e vegetação, fazendo com que a estimativa da evapotranspiração real da cultura e sua variabilidade espacial se tornam um obstáculo ao manejo da irrigação (Allen et al., 1998; Wagle & Gowda, 2019; Xiang et al., 2020).

Assim, o uso do sensoriamento remoto para estimar a evapotranspiração passa a ser uma importante ferramenta para o manejo da irrigação, uma vez que estima a evapotranspiração atual da cultura em larga escala espacial e temporal, conforme a origem das imagens, independente da cultura, fase fenológica, sistema de cultivo e região (Silva et al., 2019c; Althoff et al., 2019; Souza et al., 2020; Santos et al., 2020a). Nos últimos anos, alguns algoritmos vêm se destacando na estimativa da evapotranspiração por meio de imagens de satélite, e entre eles o *Surface Algoritmo Balanço Energético para Land* – SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998), *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* – METRIC (Allen et al., 2007a, 2007b), *Simplified Surface Energy Balance* – SSEB (Senay et al., 2016), *Two-Source Energy Balance* – TSEB (Norman et al., 1995) e *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* – SAFER (Teixeira, 2010, 2012).

Contudo, a escolha do algoritmo a ser utilizado, e se o sensoriamento remoto é sensível às alterações entre híbridos, cultura, região, disponibilidade de dados é uma questão com lacunas a serem estudadas. O modelo METRIC se limita pela necessidade de identificar pixels em condições hídricas extremas na imagem para calcular o fluxo de calor sensível, o que feito de forma incorreta pode levar ao erro das estimativas da evapotranspiração (Khand et al., 2017a; Elkatoury et al., 2019). Já no modelo SAFER, não há essa exigência de identificação de pixels âncoras, além de se poder estimar a evapotranspiração com dados agrometeorológicos provenientes de estações automáticas ou convencionais (Teixeira et al., 2013), mesmo requerendo a calibração dos coeficientes a e b para calcular ET/ET_o (Venancio et al., 2021).

À vista disto, o objetivo do estudo foi avaliar o desempenho dos algoritmos SAFER e METRIC na estimativa da evapotranspiração atual do tomateiro industrial irrigado por pivô central no centro-sul de Goiás.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em seis áreas, sendo três delas repetidas com dois cultivos, de produção de de tomate para processamento industrial, irrigadas por pivô central no estado de Goiás, localizadas nos municípios de Palmeiras de Goiás, Anápolis, Silvânia, Gameleira de Goiás, Hidrolândia e Piracanjuba (Figura 3.1, Tabela 3.1), durante o período de abril a outubro de 2018 e 2019.

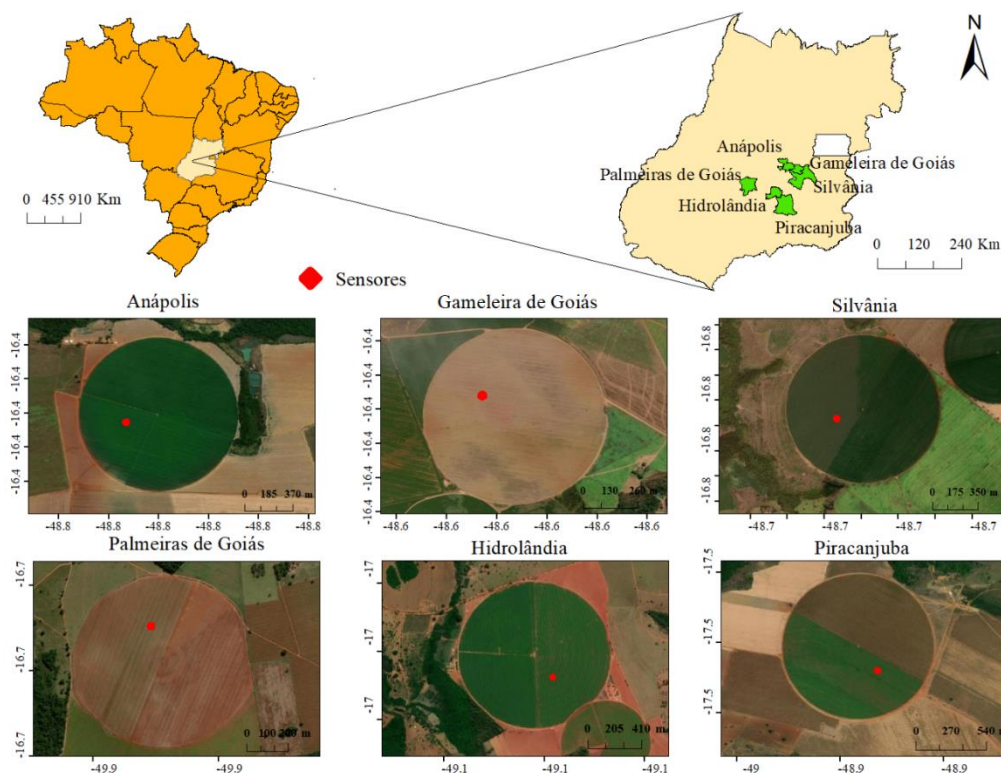


Figura 3.1 Mapa da localização dos municípios e das áreas de estudo.

Tabela 3.1 Coordenadas geográficas e altitude das áreas de estudo.

Cidade	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)
Palmeiras de Goiás	16°41'45" S; 49°53'05" W	670
Silvânia	16°45'57" S; 48°40'05" W	960
Piracanjuba	17°32'24" S; 48°56'29" W	690
Anápolis	16°26'18" S; 48°50'18" W	1002
Gameleira de Goiás	16°22'43" S; 48°37'11" W	975
Hidrolândia	17°01'48" S; 49°07'04" W	718

O clima da região é do tipo Aw de acordo com Köppen-Geiger, clima tropical, com inverno seco e verão chuvoso, precipitação média anual de 1500 mm e temperatura

média do ar anual de 23,4 °C (Kottek et al., 2006; Cardoso et al., 2014). O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (Embrapa, 2013). As demais descrições técnicas sobre o cultivo de tomate para processamento industrial nas áreas analisadas estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Descrições técnicas do cultivo de tomate para processamento industrial nas áreas estudadas.

Local	Área (ha)	Ciclo	Híbrido	Transplântio	Colheita	Sistema*
Anápolis	50	127	N-901	15/05/2018	18/09/2018	PD
Gameleira de Goiás	25	114	CRV-6116	23/05/2018	13/09/2018	PD
Hidrolândia	50	125	N-901	29/05/2019	30/09/2019	PD
Palmeiras de Goiás	25	109	N-901	06/05/2018	22/09/2018	PD
Palmeiras de Goiás	25	113	N-901	17/06/2019	07/10/2019	PD
Piracanjuba	50	125	N-901	23/05/2019	24/09/2019	PC
Piracanjuba	50	112	CRV-2909	26/03/2019	15/07/2019	PC
Silvânia	50	129	N-901	08/05/2018	13/09/2018	PC
Silvânia	50	120	H-9553	26/05/2019	12/09/2019	PD

*PC: Plantio convencional; PD: Plantio Direto

3.2.3 Balanço hídrico do solo

O balanço de água no solo foi calculado de acordo com Libardi (2012), utilizando a Equação 1:

$$P + I - D + AC \pm ES \pm \Delta ARM - ET = 0 \quad (1)$$

em que: P - precipitação pluvial; mm; I - irrigação, mm; D - drenagem interna, mm; AC - ascensão capilar, mm; ES - escoamento superficial, mm; ΔARM - variação de armazenamento de água no perfil de solo, mm e ET - evapotranspiração, mm.

O escoamento superficial foi considerado nulo devido à baixa declividade das áreas analisadas. O armazenamento de água no solo foi calculado pela regra de Simpson (Libardi, 2012), considerando que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente

espaçados, desde a superfície ($z = 0,0$ m) até a profundidade de interesse ($z = L = 0,50$ m), de acordo com a Equação 2:

$$\text{ARM} = \int_0^L \theta(Z) dZ = \frac{Z}{3} (\theta_0 + 4\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

em que: θ - conteúdo de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), obtido com os sensores tipo de umidade do solo do tipo FDR.

A 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 3:

$$\Delta\text{ARM} = [\theta_f - \theta_i]L = A_f - A_i \quad (3)$$

em que: A_f e A_i são os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

Para a determinação do armazenamento de água no perfil de solo, da precipitação e da irrigação foram instaladas três baterias de sensores, em que cada bateria continha, três sensores EC-5 da Decagon Devices, nas profundidades de 0,1, 0,3 e 0,5 m e um pluviômetro de báscula modelo ECRN 5 da Decagon Devices, todos conectados a uma datalogger EM-50 da Decagon Devices, sendo as leituras realizadas a cada 20 minutos (Figura 3.2). Os sensores foram calibrados de acordo com Sena et al., (2020).

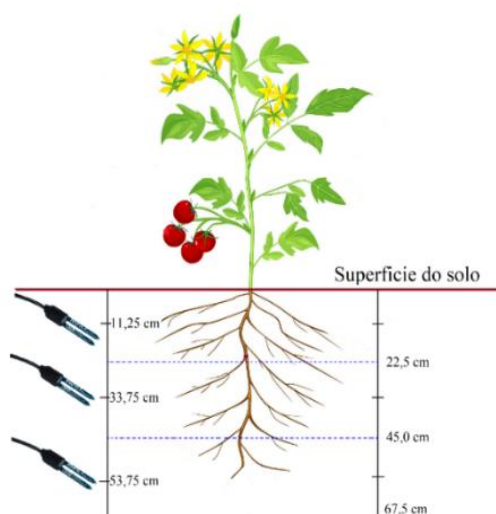


Figura 3.2 Esquema da instalação dos sensores de umidade do solo EC-5 em campo de tomate para processamento industrial.

3.2.3 Imagem do Landsat 8

Para a estimativa da evapotranspiração pelos modelos SAFER e METRIC, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, com resolução espacial multiespectrais de 30 m e térmica de 100 m, com resolução temporal de 16 dias, das órbita/ponto 221/72 e 222/72, Landsat Collection 1 Level 1, e imagens de Modelo Digital de Elevação (DEM) obtidas da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) das áreas de interesse. Ambas adquiridas gratuitamente no banco de imagens do United States Geological Survey (USGS, 2020).

A área localizada em Anápolis havia sobreposição de imagens, reduzindo a resolução temporal para 8 dias. As imagens foram pré-selecionadas e as que não apresentaram incidência de nuvens, o que pode tornar inviável para o cálculo da ET. As especificações de cada banda da imagem estão detalhadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Características das bandas do Landsat 8 OLI/TIRS, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda (λ), irradiancias espectrais no topo da atmosfera ($ESUN\lambda$) e coeficientes de calibração ($\omega\lambda$).

Bandas	λ (μm)	$ESUN\lambda$ ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	$\omega\lambda$ ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)
Band 1 – Coastal aerosol	0,43 - 0,45	1895,60	-
Band 2 – Azul	0,45 - 0,51	2004,60	0,301
Band 3 – Verde	0,53 - 0,59	1820,70	0,273
Band 4 – Vermelho	0,64 - 0,67	1549,40	0,233
Band 5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 - 0,88	951,20	0,143
Band 6 – Infravermelho médio (SWIR 1)	1,57 - 1,65	247,60	0,037
Band 7 – Infravermelho médio (SWIR 2)	2,11 - 2,29	85,50	0,013
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: Vanhellemont e Ruddick (2014) e Teixeira, 2015.

3.3.4 Implementação do algoritmo SAFER para estimativa da ET_a

Após a obtenção das imagens, as mesmas foram processadas, com correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas para o cálculo da ET. Para a obtenção da evapotranspiração pelo modelo SAFER foi utilizada a metodologia descrita por Teixeira (2010) e Teixeira et al. (2012, 2012a, 2013, 2014, 2017, 2016) como apresentado pelo o fluxograma na Figura 3.3.

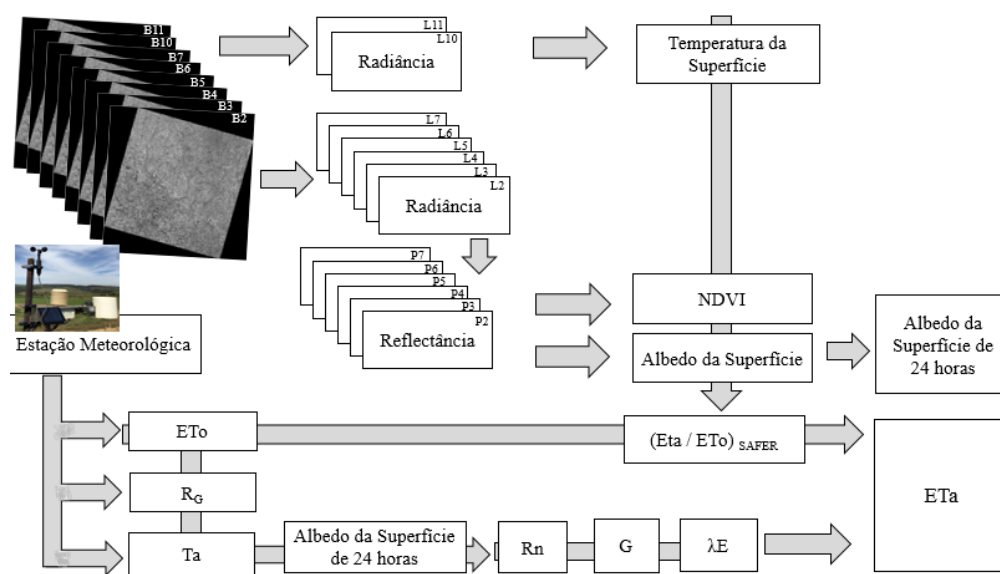


Figura 3.3 Fluxograma referindo-se à sequência metodológica utilizada para estimar a evapotranspiração pelo algoritmo SAFER.

Conversão dos valores de DN (números digitais) em radiância

Após as correções atmosféricas foi realizada a conversão da intensidade de energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor do satélite, chamada de números digitais, em radiância espectral, que é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica ($W m^{-2} sr^{-1}$) (Equação 4):

$$L\lambda = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \right) Q_{cal} + L_{MIN} \quad (4)$$

em que: 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_{cal} - intensidade do pixel (ND), número inteiro de 0 a 255.

Cálculo de reflectância

Para cada banda foi calculada a reflectância ($\rho\lambda$) a partir dos valores de radiância. A reflectância é a razão da radiação que incide em um objeto pela quantidade de radiação refletida por este (Equação 5):

$$\rho\lambda = \frac{\pi \times L\lambda}{ESUN\lambda \times \cos Z \times E_o} \quad (5)$$

em que: $L\lambda$ - radiância de cada banda; $ESUN\lambda$ - irradiância espectral no topo da atmosfera (Tabela 3.3); $\cos Z$ - ângulo zenital; E_o - ângulo diário, definido por (Equação 6):

$$E_o = 1,000110 + 0,0342221 \cos(da) + 0,001280 \sin(da) + 0,000719 \cos(2da) + 2,7 \cdot 10^{-5} \sin(2da) \quad (6)$$

em que: da - ângulo diário, definido por (Equação 7):

$$da = (dn - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (7)$$

em que: dn - dia juliano da imagem.

Albedo no topo da atmosfera

O albedo é uma medida adimensional e varia segundo as características da superfície, é a razão entre a radiação solar direta e a difusa em função do ângulo zenital solar. Para a obtenção do albedo no topo da atmosfera (α_{top}) foi utilizada a Equação 8:

$$\alpha_{top} = \sum (\omega\lambda \times \rho\lambda) \quad (8)$$

em que: α_{top} - albedo no topo da atmosfera; $\rho\lambda$ - reflectância planetária de cada banda; $\omega\lambda$ - coeficiente de calibração para cada banda, que é obtido pela Equação 9:

$$\omega\lambda = \frac{ESUN\lambda}{\sum ESUN\lambda} \quad (9)$$

em que: $\sum ESUN\lambda$ é a somatória das irradiâncias solares médias no topo da atmosfera ($W m^{-2} \mu m^{-1}$).

Albedo de superfície

Os valores do albedo de superfície foram obtidos pela Equações 10 utilizando os coeficientes de Teixeira et al. (2017):

$$\alpha_o = 0,7 * \alpha_{top} + 0,06 \quad (10)$$

em que: α_o – albedo de superfície; α_{top} - albedo no topo da atmosfera.

Temperatura de superfície

Segundo Teixeira et al. (2013), os fundamentos do sensoriamento remoto termal estão embasados na termodinâmica clássica e na física quântica, solucionado pelas Leis de Kirchhoff e 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. A imagem de temperatura da superfície foi elaborada utilizando as imagens do infravermelho termal do sensor OLI do satélite Landsat 8, calculada pela Equação 11:

$$T_o = 1,11 \times T_{bright} - 31,89 \quad (11)$$

em que: T_{bright} é obtido pela Equação 12:

$$T_{bright} = \frac{\frac{1321,08}{\ln\left(\frac{774,89}{L_{10} + 1}\right)} + \frac{1201,14}{\ln\left(\frac{480,89}{L_{11} + 1}\right)}}{2} \quad (12)$$

em que: L - radiância ($L\lambda$) das bandas termais 10 e 11.

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

O NDVI (Equação 13) é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a + 1 e para as superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (13)$$

em que: IVP - reflectância da banda no infravermelho próximo (Banda 5); V - reflectância da banda no vermelho (Banda 4).

Para o cálculo dos valores instantâneos da relação ET/ET_o , foi utilizado a Equação 14:

$$\frac{ET}{ET_o} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_o}{\alpha_o \times NDVI} \right) \right] \quad (14)$$

em que: α_o - albedo de superfície; T_o - temperatura de superfície (°C); NDVI - Normalized Difference Vegetation Index; a e b - coeficientes utilizado o valor de 1,0 (Hernandez et al.,

em que: LE - fluxo de calor latente ($W m^{-2}$); R_n - radiação líquida ($W m^{-2}$); G - fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); H - fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$).

Fluxo de calor no solo (G)

O fluxo de calor do solo é a taxa de armazenamento de calor ou liberado no solo e de culturas devido à transferência (condução) de calor. É estimado empiricamente usando a função de Bastiaanssen (2000) (Equação 17):

$$\frac{G}{R_n} = T_s (0,0038 + 0,0074 \alpha) \cdot (1 - 0,98NDVI^4) \quad (17)$$

em que: G – fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); T_s - temperatura da superfície ($^{\circ}C$); α - albedo de superfície; NDVI - índice de vegetação normalizada; e R_n – radiação líquida ($W m^{-2}$).

Radiação líquida (R_n)

A radiação líquida (R_n) ou saldo de radiação na superfície da terra ($W m^{-2}$) é a diferença entre a radiação de entrada de ondas curtas e de saída de radiação de ondas longas (Equação 18):

$$R_n = RS_{\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + RL_{\downarrow} - RL_{\uparrow} - (1 - \epsilon_0) RL_{\downarrow} \quad (18)$$

em que: RS_{\downarrow} - radiação de onda curta de entrada ($W m^{-2}$) (radiação solar refletida pela superfície), α - albedo de superfície (adimensional); RL_{\downarrow} - radiação de ondas longas de entrada ($W m^{-2}$); RL_{\uparrow} - radiação de onda longa de saída ($W m^{-2}$); ϵ_0 - emissividade da superfície térmica (adimensional); e $(1 - \epsilon_0) RL_{\downarrow}$ - fração de radiação de ondas longas de entrada refletida a partir da superfície.

O albedo de superfície foi determinado através da integração da refletância espectral das imagens do satélite (Tasumi et al., 2007). A emissividade da superfície foi calculada usando uma equação empírica de acordo com Allen et al. (2005).

Albedo de superfície (α)

O albedo de superfície é definido como a proporção da radiação refletida da radiação de onda curta incidente, calculada pela Equação 20:

$$\alpha = \frac{(\alpha_{\text{top}} - \alpha_{\text{atm}})}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (19)$$

em que: α_{top} - albedo no topo da atmosfera (Equação 7); α_{atm} - radiação solar refletida pela atmosfera que varia de 0,025 a 0,04 (Bastiaanssen, 2000); e τ_{sw} - transmissividade atmosférica.

A transmissividade atmosférica (τ_{sw}) é a fração da radiação solar incidente que é transmitida pela atmosfera, incluindo os efeitos de absorção e reflexão que ocorrem na atmosfera, tanto para a radiação direta como para difusa, calculado pela equação 20:

$$\tau_{\text{sw}} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z \quad (20)$$

em que: z - altitude da área de interesse (m), obtido pela imagem de Modelo de Elevação Digital do terreno (DEM).

Radiação de onda curta de entrada (incidente)

A $R_S \downarrow$ (W m^{-2}) é a densidade do fluxo de radiação solar direta e difusa que de fato atinge a superfície da terra, calculada pela Equação 21, em função da radiação teórica no topo da atmosfera e transmissividade atmosférica, de acordo com (Allen et al., 1998):

$$R_S \downarrow = S \cdot \cos \theta \cdot d_r \cdot \tau_{\text{sw}} \quad (21)$$

em que: S - constante solar (1367 W m^{-2}); θ - ângulo de incidência solar; d_r - inverso do quadrado da distância terra-sol em relação ao local, e τ_{sw} - transmissividade atmosférica.

Radiação de ondas longas de entrada, incidente ($RL \downarrow$)

A $RL \downarrow$ (W m^{-2}) é densidade do fluxo de radiação térmica emitido pela superfície da Terra para a atmosfera, calculada utilizando a equação de Kirchoff, baseada na Lei de Stefan-Boltzmann (Allen et al., 2002), Equação 22:

$$R_L \uparrow = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (22)$$

em que: ε_a - emissividade atmosférica; σ - constante de Stefan-Boltzmann; e T_s - temperatura do ar perto da superfície.

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)

O SAVI é um índice de vegetação que visa amenizar os efeitos do solo no NDVI (Equação 23):

$$SAVI = \frac{(1+L)(IVP-V)}{(L+IVP-V)} \quad (23)$$

em que: IVP - reflectância da banda no infravermelho próximo (Banda 5); V - reflectância da banda no vermelho (Banda 4); e L - fator de correção em relação a cobertura do solo, que pode variar de 0 a 1, sendo valores mais próximos de 0 (zero) para coberturas mais densas e valores próximos de 1 (um) para coberturas mais ralas. Atribui-se valores 1 para as fases I e II e 0,25 para as fases II e III da cultura do tomate para processamento industrial.

IAF (Índice de Área Foliar)

O índice de área foliar é um indicador de biomassa de cada pixel, o cálculo para obtenção é definido por Allen et al. (2002) pela Equação 24:

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69-SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (24)$$

em que: SAVI - índice de vegetação.

Emissividade de superfície

A emissividade da superfície é a razão entre a energia irradiada por um objeto ou superfície e a energia irradiada por um corpo negro. As emissividades ϵ_{NB} e ϵ_0 podem ser obtidas em relação ao SAVI e IAF segundo (Allen et al., 2007b), pelas Equações 25 e 26:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \times IAF \quad (25)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \times IAF \quad (26)$$

em que: ϵ_{NB} é a emissividade que representa o comportamento da superficial para emissão térmica na faixa relativamente estreita 6 de Landsat (10,4 a 12,5 μm), e ϵ_0 é a emissividade que representa o comportamento da superfície para emissão térmica no amplo espectro térmico.

Temperatura de superfície (T_s)

A temperatura na superfície terrestre (Equação 27) é deduzido a partir das bandas de infravermelhos térmicos de Landsat 8. Para obtenção da temperatura da superfície é necessária a radiância espectral da banda termal ($L_{\lambda 6}$) e a emissividade (ϵ_{NB}).

$$T_s = \frac{\frac{1321,08}{\ln\left(\frac{774,89}{L_{10}+1}\right)} + \frac{1201,14}{\ln\left(\frac{480,89}{L_{11}+1}\right)}}{2} \quad (27)$$

em que: L - radiância (L_{λ}) das bandas termais 10 e 11.

Radiação de onda longa de saída, incidente (RL_{\uparrow})

A radiação de onda longa incidente pela superfície (RL_{\uparrow}) foi calculada pela Equação 28:

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (28)$$

em que, ϵ_a - emissividade atmosférica (Equação 29); σ - constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), e T_a - temperatura do ar perto da superfície (K), conforme Allen et al. (2007b).

$$\epsilon_a = 0,85 \times (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (29)$$

em que: τ_{sw} - transmissividade atmosférica

Fluxo de calor sensível (H)

O fluxo de calor sensível é a transferência de calor causada pela diferença de temperatura através de convecção e de transmissão devido a uma diferença de temperatura, rugosidade da superfície e velocidade do vento. A função H é calibrada para cada imagem específica do satélite a partir de uma função aerodinâmica (Allen et al., 2005).

Fluxo de calor sensível é determinado utilizando a equação de transferência de calor a partir aerodinâmico como se segue (Equação 30):

$$H = \rho_{air} C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (30)$$

em que: ρ_{air} - densidade do ar (kg m^{-3}); C_p - calor específico do ar ($1,004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$); r_{ah} - resistência aerodinâmica para transferência de calor (s.m^{-1}) entre duas alturas da superfície

z_1 (0,1 m) e z_2 (2 m), calculada para cada pixel, a partir da velocidade do vento e da estabilidade atmosférica (Allen et al., 2007b); e dT - diferença de temperatura entre duas alturas z_1 (0,1 m) e z_2 (2 m) em uma camada de mistura próxima da superfície.

No modelo METRIC, os valores de r_{ah} e dT são calibrados internamente pelo processo CIMEC (*Calibration using Inverse Modeling at Extreme Conditions*) utilizado em balanço de energia (Bastiaanssen, 1998; Allen et al., 2007b). Essa calibração baseia-se na relação linear entre dT e T_s em duas condições extremas, ou seja, entre dois pontos de ancoragens. O pixel de ancoragem “frio” é representado, principalmente, por áreas bem irrigadas e com cobertura do solo totalmente vegetada e supõe-se que o evapotranspiração máximo seja igual ao evapotranspiração de referência multiplicado por um coeficiente constante. O pixel “quente” é representado, principalmente, por áreas sob condições secas e com pouca ou nenhuma cobertura do solo (solo exposto) com evapotranspiração próximo de zero. Essa calibração reduz a necessidade de correção do impacto do aumento da altitude na temperatura superficial, na polarização da rugosidade da superfície aerodinâmica e correções atmosféricas (Allen et al., 2005; 2007a).

Evapotranspiração instantânea

O fluxo de calor latente é calculado para cada pixel no instante da passagem do satélite e é convertida à evapotranspiração instantânea (Allen et al., 2007a) (Equação 31):

$$ET_{inst.} = 3600 \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad (31)$$

em que: $ET_{inst.}$ - ET instantânea ($mm\ h^{-1}$); LE - fluxo de calor latente consumido pela ET ($W\ m^{-2}$); ρ_w - densidade da água ($1000\ kg\ m^{-3}$); 3600 é a conversão de tempo de segundos para horas; e λ - calor latente de vaporização ($J\ kg^{-1}$), que representa o calor absorvido quando um quilograma de água evapora e é calculado pela Equação 32:

$$\lambda = (2,501 - 0,00236(T_s - 273,15)) \times 10^6 \quad (32)$$

em que: T_s – temperatura de superfície ($^{\circ}C$).

Evapotranspiração de referência fracionada

A evapotranspiração de referência fracionada (ET_F), ou coeficiente de cultura (Allen et al., 2011), é definida como a razão entre o evapotranspiração instantânea computadorizada para cada pixel para a referência ET (ET_R), calculada pelos dados da estação meteorológica próxima à área de estudo (Equação 33):

$$ET_F = \frac{ET_{inst}}{ET_H} \quad (33)$$

em que: ET_{inst} – evapotranspiração instantânea ($mm\ h^{-1}$); e ET_H – evapotranspiração de referência no momento da passagem do satélite ($mm\ h^{-1}$).

Evapotranspiração real

Evapotranspiração atual (ET_a – $mm\ dia^{-1}$) obtida pelo METRIC e SAFER foram obtidas segundo a Equação 34:

$$ET_a = ET_F \cdot ET_o \quad (34)$$

em que: ET_{rF} – evapotranspiração de referência fracionada; ET_o – evapotranspiração de referência - FAO 56 ($mm\ dia^{-1}$) (Allen et al., 1998).

A escolha dos pixels com o valor da ET_a (SAFER e METRIC) dentro da área do pivô central ocorreu de formar que, em todas as imagens analisadas durante o ciclo da cultura do tomate para processamento industrial, tiveram a mesma localização. Os pixels controle localizaram-se a um raio de 120 m de distância das baterias de sensores.

3.2.6 Evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficiente da cultura (K_c)

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi determinada pelo método Penman-Monteith FAO-56 de acordo com Allen et al. (1998), os dados meteorológicos diários foram provenientes de estações meteorológicas automática instaladas em um raio de 50 m das áreas de estudo.

Os valores da evapotranspiração estimada pelo modelo SAFER (ET_{SAFER}) e METRIC (ET_{METRIC}) foram comparados aos da evapotranspiração obtidos pelo balanço hídrico do solo (ET_{BHS}), ao obtido pelo método da FAO-56, utilizando o coeficiente da

cultura - ET_{FAO} (Allen et al., 1998) e pelos coeficientes recomendados pela Embrapa – Empresa brasileira de pesquisa agropecuária - $ET_{Embrapa}$ (Marouelli et al., 2012), de acordo como sistema de plantio (convencional ou direto) empregado na área. Os coeficientes utilizados seguem na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Coeficientes da cultura do tomate (K_c) de acordo com a FAO e Embrapa.

Estádios de desenvolvimento	Duração (dias)	K_c FAO	K_c Embrapa PC	K_c Embrapa PD
Inicial	8	0,6	0,80 – 0,90	0,35 – 0,45
Vegetativo	27	1,15	0,55 – 0,65	0,40 – 0,50
Frutificação	60	0,70 - 0,90	1,00 – 1,11	0,95 – 1,05
Maturação	30	0,6	0,25 – 0,35	0,25 – 0,35

*FAO 56 (Allen et al., 1998); **Embrapa (Marouelli et al., 2012); PC: Plantio convencional; PD: Plantio Direto.

3.2.7 Análise estatística

Para avaliação do desempenho estatístico da estimativa da evapotranspiração real (ET_r) pelos algoritmos SAFER e METRIC, estes foram avaliados comparando-os com a evapotranspiração estimada considerando o método padrão da FAO 56 para obter ET_o , com posterior multiplicação pelo K_c da FAO e da Embrapa, e pelo balanço de água no solo. Os dados foram analisados por meio, de análise de regressão linear, em que se consideraram os indicadores estatísticos, coeficiente de determinação (R^2 - Equação 35), coeficiente de correlação simples de Pearson “r” (Equação 36), pelo índice de concordância “d” Willmott (Willmott et al., 1985) (Equação 37), erro médio absoluto (EMA – Equação 38), erro quadrado médio (EQM – Equação 39), raiz do erro quadrático médio (REQM – Equação 40), e índice de confiança (IC) ou desempenho “c”(Equação 41), obtida pelo produto do índice de Willmott e do coeficiente de correlação de Pearson, proposto por Camargo e Sentelhas (1987). O IC foi classificado de acordo com os critérios relacionados na Tabela 3.5.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (35)$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum (O_i - E_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2}} \quad (36)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (37)$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum |O_i - E_i| \quad (38)$$

$$EQM = \frac{1}{n} \sum (O_i - E_i)^2 \quad (39)$$

$$REMA = \sqrt{\frac{\sum |O_i - E_i|}{n}} \quad (40)$$

$$c = r \cdot d \quad (41)$$

em que: O_i o valor observado (evapotranspiração determinado pelo método FAO, Embrapa e BHS), mm dia^{-1} ; E_i o valor estimado pelo algoritmo SAFER e METRIC, mm dia^{-1} ; e O a média dos valores observados, mm dia^{-1} , n é o número de observações.

Tabela 3.5 Critério de interpretação do índice de confiança (Camargo & Sentelhas, 1997)

Valor de “c”	Desempenho
$c > 0,85$	Ótimo
$0,76 \leq c \leq 0,85$	Muito bom
$0,66 \leq c \leq 0,75$	Bom
$0,61 \leq c \leq 0,65$	Mediano
$0,51 \leq c \leq 0,60$	Sofrível
$0,41 \leq c \leq 0,50$	Mau
$c \leq 0,40$	Péssimo

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados referentes ao acúmulo térmico, acúmulo de precipitação, de evapotranspiração de referência e o acúmulo da irrigação durante o ciclo do tomateiro industrial nas áreas estudadas estão descritos na Tabela 3.6. Nota-se que o acúmulo térmico variou entre 1127,1 a 1605 °C. O maior acúmulo de precipitação foi observado na área de Piracanjuba para o ano agrícola de 2019 com total de 280,3 mm. O acúmulo de irrigação durante o ciclo obteve média de 346,67 mm.

Tabela 3.6 Acumulado térmico para o período de cultivo, de precipitação, da ET_o e da lâmina de irrigação do tomateiro industrial para as áreas avaliadas em 2018 e 2019.

Local	Ano	Acúmulo	Acúmulo	Acúmulo	Acúmulo
		Térmico	Precipitação	ET _o	Irrigação
		°C	mm		
Anápolis	2018	1227,8	65,8	330	386
Silvânia	2018	1443,8	22,6	455	458
Silvânia	2019	1318,4	26,2	442	321
Palmeiras de Goiás	2018	1428,9	90,8	335	283
Palmeiras de Goiás	2019	1605,0	53,4	458	396
Gameleira de Goiás	2019	1127,1	2,8	375	344
Hidrolândia	2019	1505,2	17,4	398	360
Piracanjuba	2018	1331,0	57,4	483	448
Piracanjuba	2019	1186,7	280,3	272	124

Na Tabela 3.7 estão expostos os valores da evapotranspiração do tomate para processamento industrial estimado pelo balanço hídrico do solo - BHS (Libardi, 2012), FAO-56 (Allen et al., 1998), Embrapa (Marouelli et al., 2012) e pelos algoritmos SAFER (Teixeira, 2012) e METRIC (Allen et al., 2007b) nas datas referentes aos dias de passagem do satélite Landsat 8 sobre as áreas estudadas. Observa-se que ET_o teve média geral de 3,67 mm dia⁻¹, variando de 1,7 a 8,1 mm dia⁻¹.

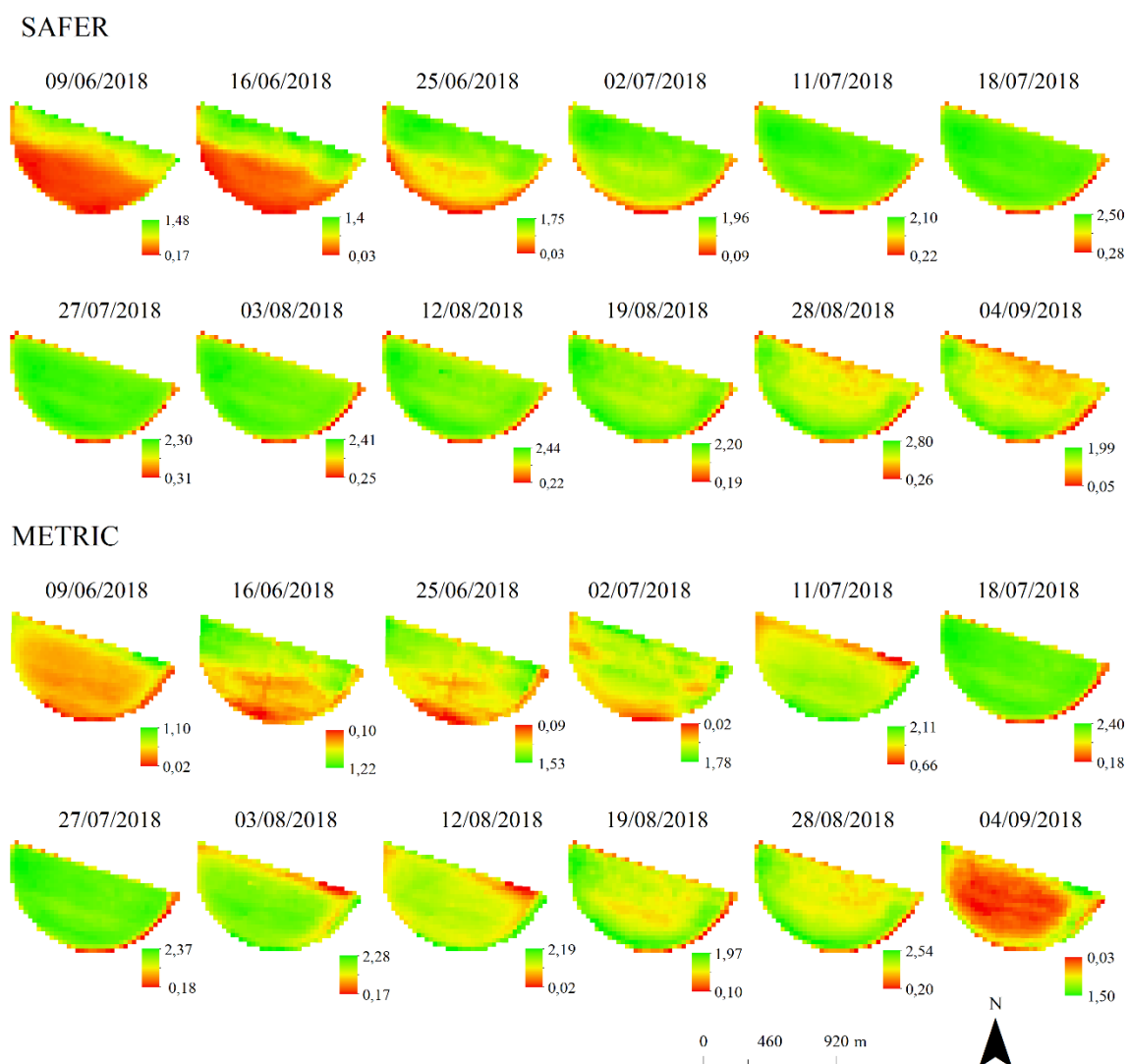
Tabela 3.7 Evapotranspiração do tomate para processamento industrial, nas datas de passagem do Landsat 8, de acordo com o balanço hídrico do solo (BHS), FAO, Embrapa, SAFER e METRIC.

Local	Data	DAT	ET _o	ET				
				BHS	FAO	Embrapa	SAFER	METRIC
mm dia⁻¹								
Anápolis 2018	09/06/2018	26	2,6	2,00	1,60	1,50	1,30	1,00
	16/06/2018	33	2,7	1,55	1,62	1,11	1,35	1,20
	25/06/2018	42	2,4	1,50	1,44	1,68	1,61	1,41
	02/07/2018	49	2,6	2,00	2,08	1,95	1,90	1,75
	11/07/2018	58	2,4	2,20	2,28	2,16	2,05	1,93
	18/07/2018	65	2,9	2,60	2,61	2,61	2,35	2,37
	27/07/2018	74	2,9	2,30	2,46	2,47	2,25	2,20
	03/08/2018	81	2,9	2,40	2,46	2,32	2,32	2,23
	12/08/2018	90	3,8	2,40	2,66	2,28	2,34	2,10
	19/08/2018	97	3,5	2,00	2,10	1,93	1,96	1,80
	28/08/2018	106	5,0	2,50	2,75	2,50	2,51	2,20
	04/09/2018	113	5,2	2,00	2,60	1,82	1,92	1,30
Palmeiras de Goiás 2018	16/06/2018	41	3,0	1,70	1,80	1,05	1,00	0,85
	02/07/2018	57	2,8	2,00	1,82	1,68	1,70	1,73
	18/07/2018	73	3,3	2,87	2,81	2,81	2,57	2,50
	03/08/2018	89	2,8	2,30	2,24	2,24	2,04	2,00
	19/08/2018	105	4,0	2,45	2,40	2,40	2,40	2,20
	04/09/2018	121	4,9	2,50	2,94	2,45	2,45	2,00
Palmeiras de Goiás 2019	21/07/2019	34	3,1	2,50	2,48	2,17	2,2	1,80
	06/08/2019	50	5,0	5,11	5,00	5,00	5,15	4,80
	22/08/2019	66	4,7	3,00	3,06	3,06	2,90	2,30
	07/09/2019	82	6,0	3,50	3,90	3,60	3,60	3,33
	23/09/2019	98	6,3	3,23	3,78	2,21	2,08	1,70
	25/06/2018	49	3,1	2,00	2,17	2,02	1,55	1,25

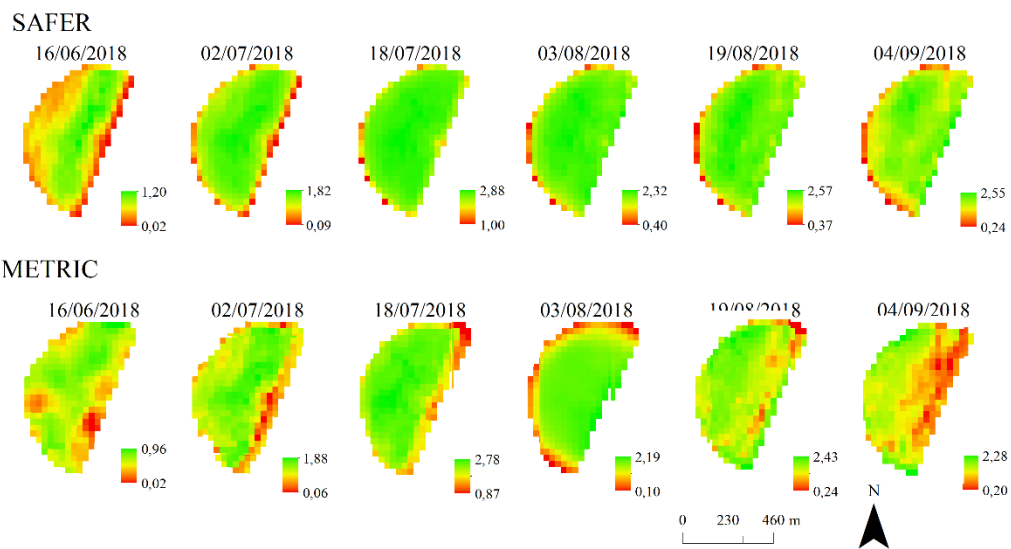
Silvânia 2018	11/07/2018	65	2,6	2,40	2,34	2,34	2,21	2,00
	27/07/2018	81	4,1	3,40	3,49	3,69	3,40	3,10
	12/08/2018	97	3,8	3,35	3,23	3,42	3,04	3,00
	28/08/2018	113	6,0	5,00	5,10	5,10	5,20	5,00
	13/09/2018	129	6,6	2,00	3,60	1,80	1,70	1,50
Silvânia 2019	28/06/2019	34	4,2	2,40	2,52	1,89	1,80	1,85
	14/07/2019	50	3,2	2,50	2,08	1,60	1,65	1,62
	15/08/2019	82	4,8	4,00	4,08	3,84	3,36	3,20
	31/08/2019	98	4,9	2,80	3,18	2,45	2,42	2,10
	16/09/2019	114	8,1	3,00	4,50	2,80	2,80	2,70
Piracanjuba 2018	25/06/2018	34	2,1	1,50	1,26	1,26	0,95	0,90
	11/07/2018	50	2,1	2,05	1,68	1,58	1,50	1,42
	27/07/2018	66	2,4	2,03	1,92	1,82	1,81	1,70
	12/08/2018	82	1,7	1,50	1,28	1,28	1,23	1,15
	13/09/2018	114	4,4	1,90	2,10	1,54	1,50	1,20
Piracanjuba 2019	11/05/2019	47	2,7	1,50	1,60	1,48	1,35	1,20
	27/05/2019	63	2,4	1,60	1,68	1,56	1,45	1,40
	12/06/2019	79	2,2	2,00	1,87	1,87	1,83	1,75
	28/06/2019	95	2,4	1,50	1,44	1,44	1,44	1,40
	14/07/2019	111	2,8	1,38	1,68	1,12	1,30	1,20
Gameleira de Goiás 2019	28/06/2019	37	3,1	1,98	1,86	1,89	1,58	1,30
	14/07/2019	53	2,9	1,47	1,89	1,89	1,86	1,70
	30/07/2019	69	2,7	2,00	1,89	1,89	1,91	1,70
	15/08/2019	85	4,2	3,00	2,94	2,94	2,83	2,80
	31/08/2019	101	3,9	2,05	2,34	1,95	1,95	1,70
	16/09/2019	117	5,4	1,95	2,97	1,89	1,89	1,83
Hidrolândia 2019	05/07/2019	38	2,2	1,80	1,32	1,32	1,30	1,20
	22/08/2019	86	3,4	2,00	2,38	2,38	2,00	1,90
	07/09/2019	102	4,1	2,30	2,46	2,25	2,10	2,00
	23/09/2019	118	4,8	2,00	2,88	1,49	1,61	1,60

A evapotranspiração média diária do tomateiro industrial durante todos os ciclos analisados foi de 2,37; 2,52 e 2,23 mm dia⁻¹ de acordo com o método do BHS, FAO e Embrapa, respectivamente. A média geral da ET_a foi de 2,15 mm dia⁻¹, estimada pelo modelo SAFER, e de 1,97 mm dia⁻¹, estimada pelo modelo METRIC.

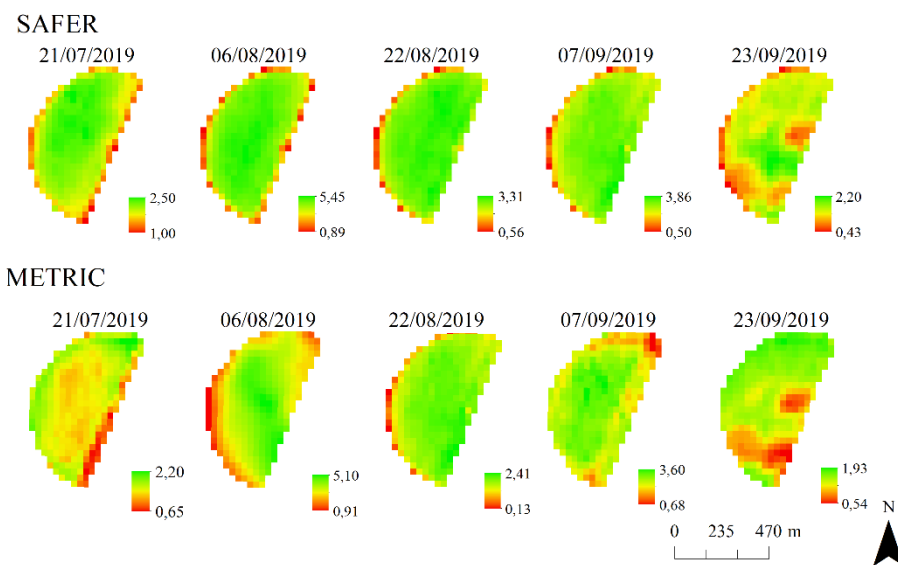
Na Figura 3.5 encontra-se os mapas da distribuição espaço temporal da ET_a do tomate para processamento industrial, estimada pelo algoritmo SAFER (ET_{SAFER}) e METRIC (ET_{METRIC}) para as áreas de estudo nos anos de 2018 e 2019.



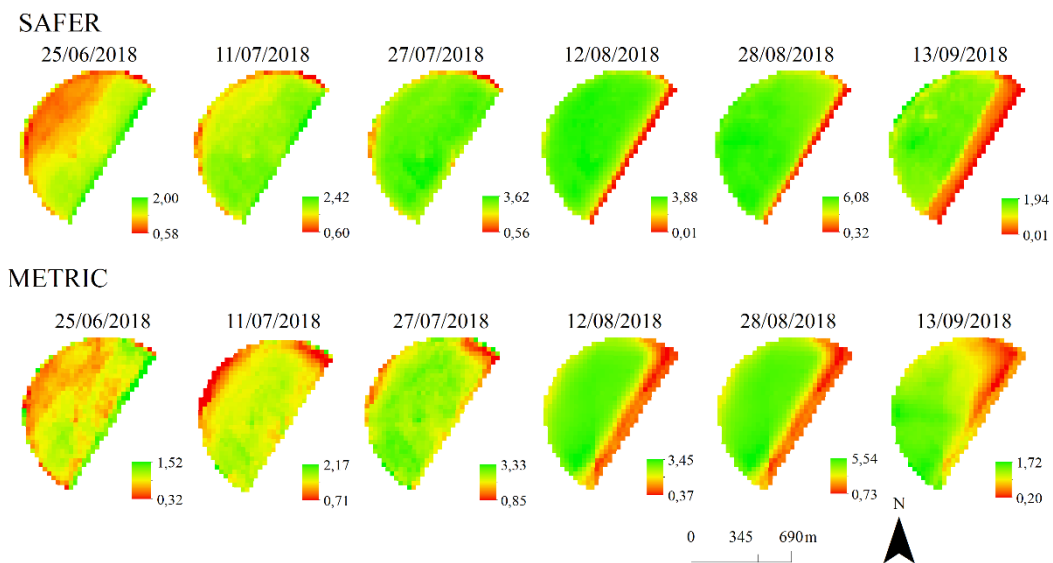
3.5.1 Anápolis 2018



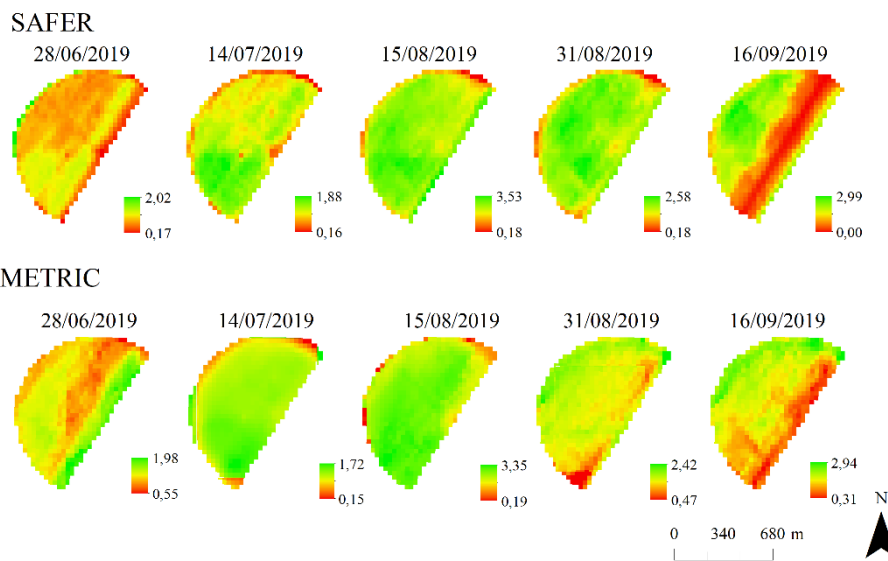
3.5.2 Palmeiras de Goiás 2018



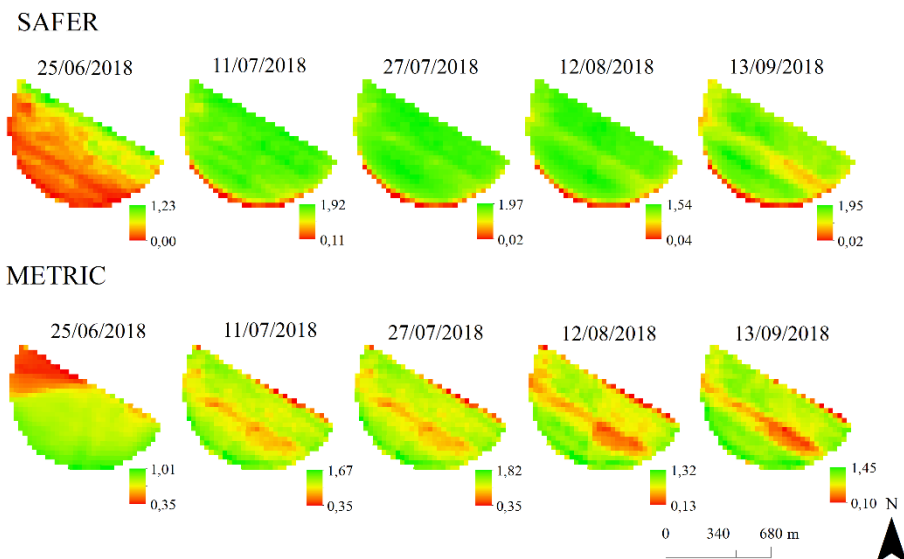
3.5.3 Palmeiras de Goiás 2019



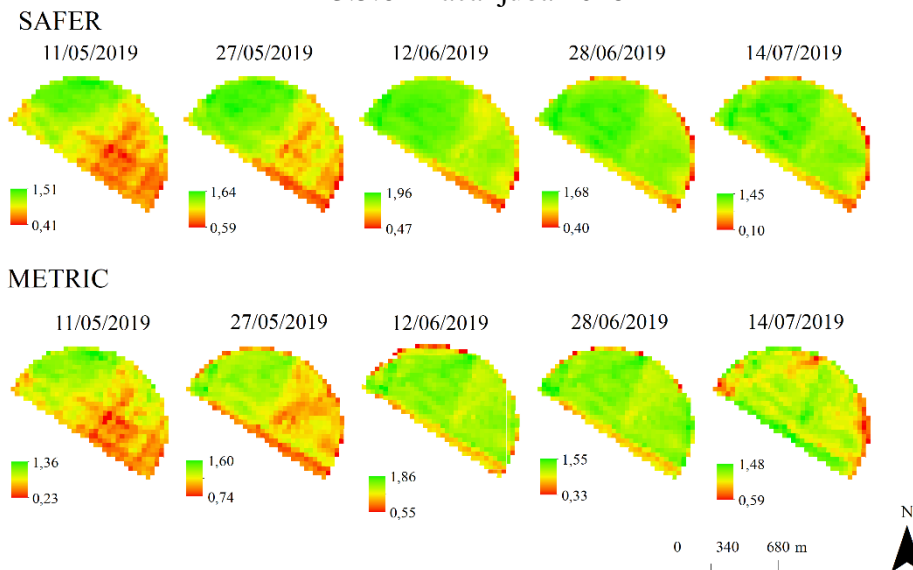
3.5.4 Sylvania 2018



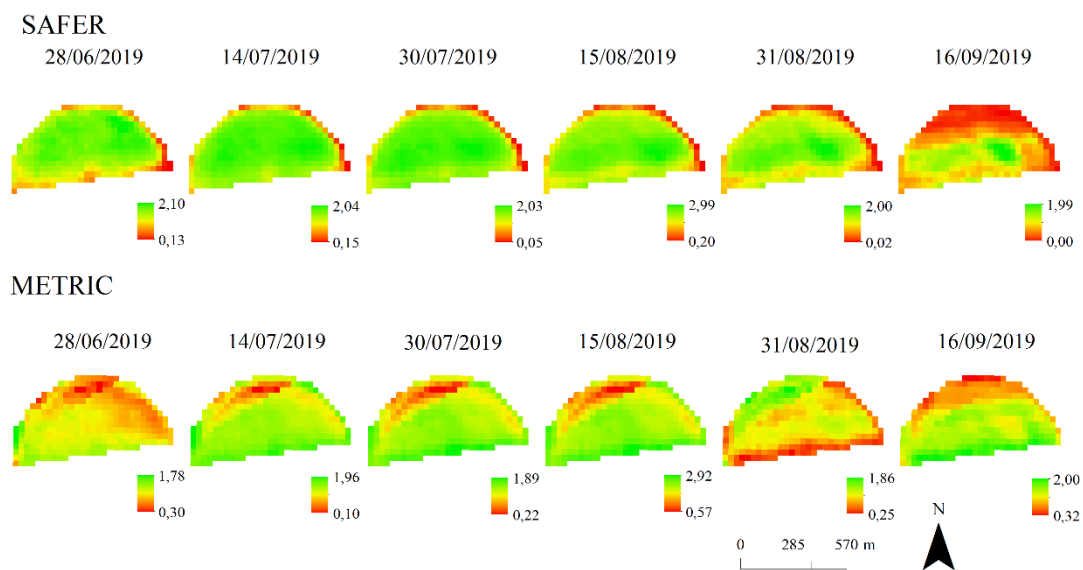
3.5.5 Silvania 2019



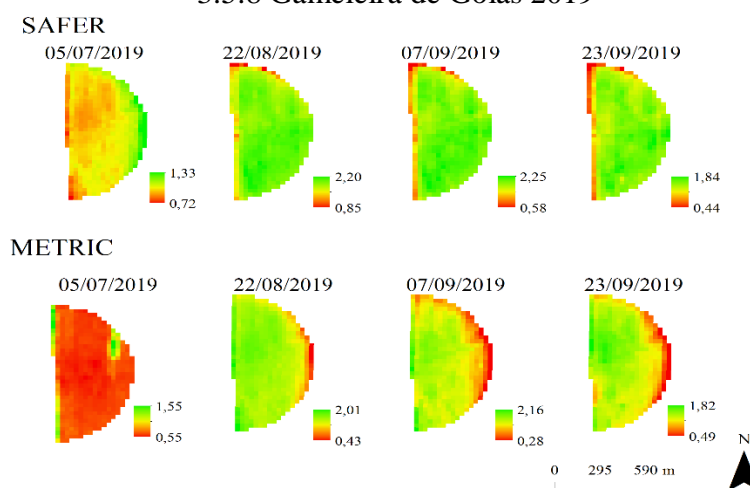
3.5.6 Piracanjuba 2018



3.5.7 Piracanjuba 2019



3.5.8 Gameleira de Goiás 2019



3.5.9 Hidrolândia 2019

Figura 3.5 Distribuição espacial e temporal da evapotranspiração do tomate para processamento industrial estimada pelos modelos SAFER (ET_{SAFER}) e METRIC (ET_{METRIC}).

Os valores da ET_{SAFER} e ET_{METRIC} adquiridas pelas imagens do Landsat 8 durante o ciclo da cultura do tomate para processamento industrial variaram de acordo com o estágio de desenvolvimento deste, e ao longo da área plantada. Essa capacidade de simulação da variabilidade espacial da evapotranspiração ao longo de um ciclo e de uma área foram observadas e fundamentadas em outras pesquisas tanto com SAFER (Santos et al., 2020b; Mussi et al., 2020) quanto com METRIC (Poça et al., 2014; Khand et al., 2017a; Oliveira et al., 2018).

Na Figura 3.5 observou-se maior uniformidade dos valores da ET_a ao longo das áreas estudadas pelo algoritmo SAFER do que pelo METRIC, o que nos sugere maior confiabilidade ao modelo SAFER. Essa discrepância na produção do mapa de distribuição da ET_a também foi relatada por Teixeira et al. (2013), ao investigarem a aplicabilidade do algoritmo SAFER e SEBAL, e neste estudo, o SEBAL apresentou essa alteração na estimativa da ET.

No início do ciclo, quando há pouca cobertura vegetal, período de estabelecimento das mudas em campo, e no final do ciclo, quando o tomateiro inicia o estágio de senescência, e início da colheita, a ET_{SAFER} e ET_{METRIC} apresentaram os menores valores para todas as áreas estudadas, comparada com o estágio vegetativo e de frutificação do tomate para processamento industrial. Para essas fases, de baixa evapotranspiração, o algoritmo METRIC apresentou menores valores do que o SAFER.

Esse fenômeno é observado com frequência na estimativa da evapotranspiração da cultura utilizando imagens de satélite (French et al., 2015; Sales et al., 2016, 2017; Althoff et al., 2019; Souza et al., 2020). Isto pode ser justificado pela presença de solo descoberto no início e final do ciclo, interferindo negativamente na determinação dos índices de vegetação (NDVI, SAVI, IAF), um dos fatores de entrada para a estimativa da evapotranspiração por sensoriamento remoto (González-Gómez et al., 2018; Filgueiras et al., 2019; Venancio et al., 2020, 2021).

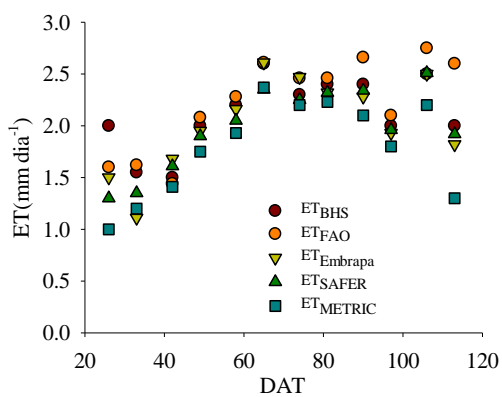
Nas áreas em que foi utilizado o sistema de plantio direto, os valores da evapotranspiração tiveram menor discrepância no início do ciclo em relação aos métodos padrões do que as áreas em que foram adotadas o sistema de plantio convencional. A existência de palhada em quantidade adequada como cobertura do solo altera a relação solo-água-atmosfera, principalmente no início do ciclo no qual o índice de área foliar da cultura não cobre totalmente o solo (Stone et al., 2006).

Xue et al. (2020) estimaram a ET_a do tomate para processamento industrial utilizando imagens orbitais e da mesma forma observaram a subestimação da ET_{METRIC} durante o início do ciclo. Estes mesmos autores atribuíram esse comportamento a influência do solo descoberto e ao fato da radiação líquida média diária ser subestimada, quando esta é calculada por equações empíricas ao redimensionar a evapotranspiração instantânea para a ET_a .

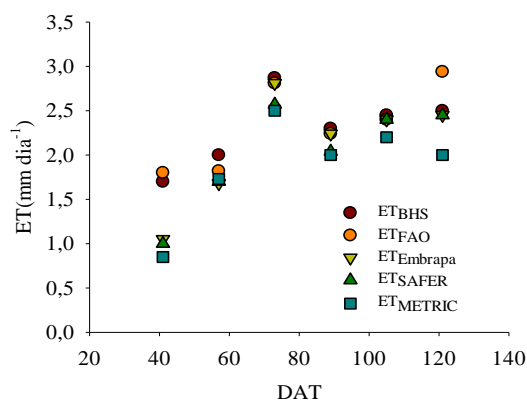
Em outra perspectiva, os baixos valores da evapotranspiração no início do ciclo da cultura pode ser explicado pelo fato do K_c da cultura variar com a alta evaporação de

água, devido ao solo descoberto e à irrigação, juntamente com resolução espacial das imagens do satélite, em que o valor do pixel pode ser afetado ou influenciado pela superfície descoberta do solo (Warren et al., 2014; Althoff et al., 2019).

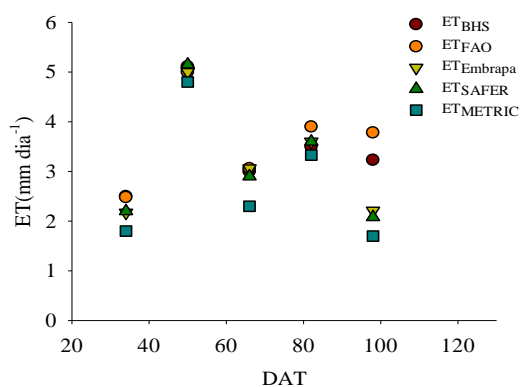
De forma geral, durante a fase vegetativa (início da floração) e início da frutificação, foram observados os maiores valores da evapotranspiração estimada pelo SAFER e METRIC. A máxima ET_{SAFER} e ET_{METRIC} observadas foram de 5,2 e 5,0 mm dia^{-1} (Figura 3.6), respectivamente, coincidindo com o período de alto vigor da cultura, estágio vegetativo de frutificação da cultura. A ET_a permaneceu relativamente alta e uniforme até o final dessa fase como consequência do estabelecimento de cultura na área, fato também descrito por Teixeira et al. (2013).



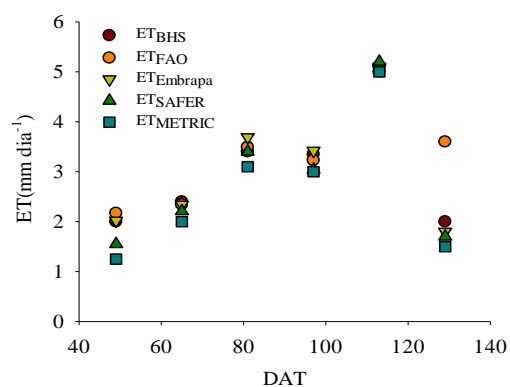
Anápolis 2018



Palmeiras de Goiás - 2018



Palmeiras de Goiás - 2019



Silvânia - 2018

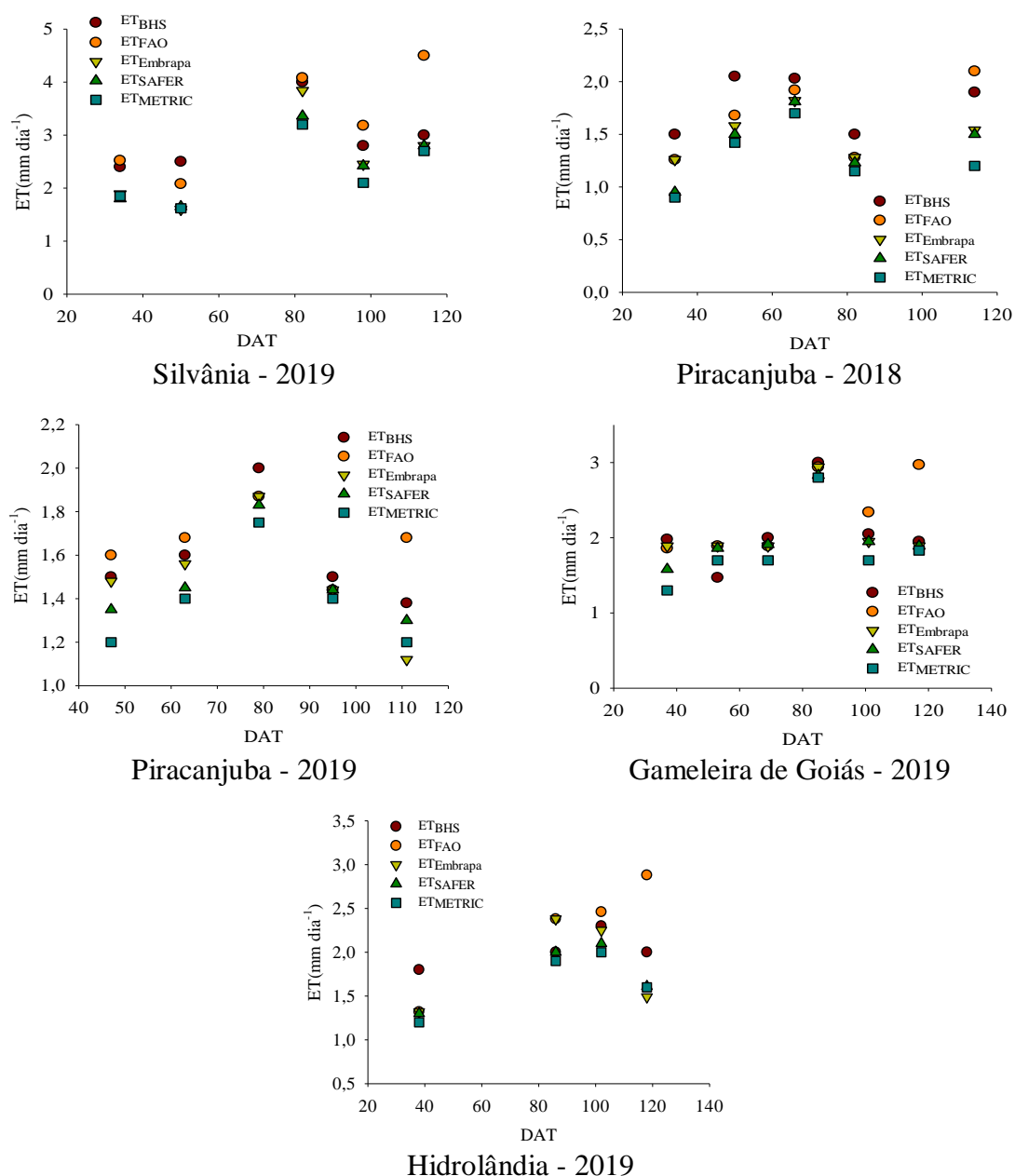


Figura 3.6 Evapotranspiração observada pelos modelos FAO-56, Embrapa, BHS e estimada pelos algoritmos SAFER e METRIC para a cultura do tomate para processamento industrial em Goiás.

De acordo com Marouelli et al. (2012) a maior ET_c ocorre nas fases de maior desenvolvimento vegetativo e decresce até a fase de maturação fisiológica do tomate para processamento industrial. Valores elevados da evapotranspiração estimada por imagens de satélite foram observados na fase de frutificação na cultura do milho (Althoff et al., 2019; Santos et al., 2020b), na fase de pleno desenvolvimento na cultura da cana-de-açúcar (Mussi et al., 2020) e do feijão (Sales et al., 2017).

Ainda que apontado similaridade, durante as fases II e III do tomate para processamento industrial os dados mostraram que os valores da ET_{METRIC} e ET_{SAFER} foram inferiores aos valores da ET_{BHS} , ET_{FAO} e $ET_{Embrapa}$. Fato semelhante também observado por Sales et al. (2017) na cultura do tomate para processamento industrial utilizando o algoritmo SAFER.

As maiores diferenças da ET_a estimada pelo modelo SAFER foi de $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$ comparando com a $ET_{Embrapa}$, de $0,68 \text{ mm dia}^{-1}$ comparando com a ET_{FAO} e de $0,85 \text{ mm dia}^{-1}$ comparando com a ET_{BHS} . Para o modelo METRIC a diferença da ET_a foi de $0,77$; $2,08$ e $1,53 \text{ mm dia}^{-1}$ comparado, respectivamente, a $ET_{Embrapa}$, ET_{FAO} e ET_{BHS} . Em ambos os casos os algoritmos subestimaram a ET_c .

Na Tabela 3.8 encontram-se os índices estatísticos para os valores da estimativa da ET_{SAFER} e ET_{METRIC} em comparação ao método FAO, Embrapa e BHS. De acordo com os resultados tanto o SAFER quanto o METRIC podem ser utilizados para a estimar a evapotranspiração do tomate para processamento industrial, posto que tiveram boa correção, concordância e baixo erro.

Em geral a ET_{SAFER} e ET_{METRIC} apresentaram melhores correlações com a $ET_{Embrapa}$ quando comparado com a ET_{BHS} e ET_{FAO} . Para o modelo SAFER os valores do erro quadro médio (EQM) ficaram entre $0,01$ e $0,59 \text{ mm dia}^{-1}$, comparado com a $ET_{Embrapa}$ o EQM foi de $0,02 \text{ mm dia}^{-1}$, e $0,24$ e $0,09 \text{ mm dia}^{-1}$ comparando com a ET_{FAO} e ET_{BHS} , respectivamente. Os erros médios absolutos (EMA) para as áreas analisadas foram menores que 1, sendo de $0,008 \text{ mm dia}^{-1}$ comparado com a $ET_{Embrapa}$, $0,28 \text{ mm dia}^{-1}$ comparado com a ET_{FAO} , e $0,19 \text{ mm dia}^{-1}$ comparado com a ET_{BHS} .

O modelo METRIC também demonstrou boa aplicabilidade para estimativa da ET_a do tomate para processamento industrial, com EQM de máximo de $0,73 \text{ mm dia}^{-1}$ e EMA máximo de $0,61 \text{ mm dia}^{-1}$, para as áreas analisadas. A raiz do erro médio absoluto (REMA) teve média geral igual a $0,1$ para todos os desempenhos julgados.

O fato dos baixos valores da ET_a encontrados no início e final do ciclo, como dito anteriormente para os modelos analisados, ocasionou o aumento no EQM e EMA, assim como os coeficientes estatísticos quando comparado a ET_{FAO} , uma vez que o K_c inicial e final utilizados neste método é considerado equivocado para área de estudo. O fato da estimativa da evapotranspiração nos extremos da cultura interferir no erro relativo de um modelo também foi descrito por Liu et al. (2010).

Tabela 3.8 Erro quadrado médio (EQM, mm dia⁻¹), erro médio absoluto (EMA, mm dia⁻¹), raiz do erro médio absoluto (REMA, mm dia⁻¹), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de confiança (c) para os valores de evapotranspiração obtidos pelos modelos SAFER e METRIC comparando-os aos métodos ET_{FAO}, ET_{Embrapa} e ET_{BHS}.

Cidade	Modelo	EQM	EMA	REMA	r	d	c	Classificação
FAO								
Anápolis	SAFER	0,088	0,262	0,12	0,91	0,88	0,80	Muito bom
	METRIC	0,279	0,431	0,19	0,76	0,72	0,55	Sofrível
Palmeiras de Goiás - 2018	SAFER	0,165	0,308	0,14	0,88	0,83	0,73	Bom
	METRIC	0,331	0,455	0,20	0,74	0,71	0,52	Sofrível
Palmeiras de Goiás - 2019	SAFER	0,388	0,324	0,09	0,82	0,86	0,70	Bom
	METRIC	0,716	0,536	0,16	0,79	0,74	0,59	Sofrível
Silvânia 2018	SAFER	0,452	0,337	0,11	0,83	0,87	0,72	Bom
	METRIC	0,621	0,453	0,15	0,82	0,82	0,67	Bom
Silvânia 2019	SAFER	0,586	0,541	0,16	0,85	0,64	0,55	Sofrível
	METRIC	0,730	0,611	0,18	0,83	0,57	0,47	Sofrível
Piracanjuba 2018	SAFER	0,063	0,156	0,09	0,89	0,91	0,81	Muito bom
	METRIC	0,134	0,234	0,14	0,80	0,83	0,67	Bom
Piracanjuba 2019	SAFER	0,033	0,113	0,07	0,93	0,92	0,86	Ótimo
	METRIC	0,061	0,165	0,10	0,91	0,88	0,80	Muito bom
Gameleira de Goiás 2019	SAFER	0,157	0,212	0,08	0,64	0,76	0,48	Sofrível

	METRIC	0,235	0,318	0,13	0,69	0,72	0,50	Sofrível
Hidrolândia 2019	SAFER	0,270	0,290	0,11	0,52	0,69	0,36	Péssimo
	METRIC	0,299	0,334	0,13	0,56	0,68	0,39	Péssimo
Embrapa								
Anápolis	SAFER	0,021	0,113	0,06	0,95	0,97	0,92	Ótimo
	METRIC	0,081	0,252	0,13	0,93	0,90	0,84	Muito bom
Palmeiras de Goiás - 2018	SAFER	0,011	0,057	0,03	0,98	0,99	0,97	Ótimo
	METRIC	0,049	0,161	0,08	0,96	0,95	0,91	Ótimo
Palmeiras de Goiás - 2019	SAFER	0,008	0,059	0,02	0,99	1,00	0,99	Ótimo
	METRIC	0,136	0,264	0,10	0,98	0,96	0,93	Ótimo
Silvânia 2018	SAFER	0,054	0,163	0,06	0,99	0,99	0,97	Ótimo
	METRIC	0,148	0,280	0,11	0,98	0,96	0,94	Ótimo
Silvânia 2019	SAFER	0,030	0,081	0,03	0,99	0,98	0,96	Ótimo
	METRIC	0,068	0,144	0,05	0,97	0,94	0,92	Ótimo
Piracanjuba 2018	SAFER	0,013	0,061	0,05	0,98	0,98	0,96	Ótimo
	METRIC	0,038	0,139	0,10	0,98	0,94	0,93	Ótimo
Piracanjuba 2019	SAFER	0,008	0,058	0,04	0,97	0,98	0,95	Ótimo
	METRIC	0,016	0,085	0,06	0,96	0,97	0,93	Ótimo
Gameleira de Goiás 2019	SAFER	0,012	0,052	0,03	0,96	0,97	0,93	Ótimo
	METRIC	0,056	0,158	0,08	0,94	0,91	0,85	Ótimo

Hidrolândia 2019	SAFER	0,026	0,096	0,05	0,94	0,95	0,90	Ótimo
	METRIC	0,046	0,137	0,07	0,90	0,93	0,83	Muito bom
BHS								
Anápolis	SAFER	0,055	0,153	0,08	0,86	0,89	0,77	Muito bom
	METRIC	0,172	0,330	0,16	0,82	0,74	0,61	Mediano
Palmeiras de Goiás - 2018	SAFER	0,124	0,277	0,14	0,96	0,86	0,82	Muito bom
	METRIC	0,222	0,423	0,20	0,94	0,78	0,73	Bom
Palmeiras de Goiás - 2019	SAFER	0,179	0,211	0,07	0,92	0,93	0,86	Ótimo
	METRIC	0,431	0,426	0,14	0,89	0,84	0,75	Bom
Silvânia 2018	SAFER	0,052	0,161	0,07	0,99	0,99	0,98	Ótimo
	METRIC	0,132	0,256	0,11	0,99	0,96	0,95	Ótimo
Silvânia 2019	SAFER	0,210	0,334	0,12	0,89	0,77	0,68	Bom
	METRIC	0,287	0,404	0,14	0,86	0,67	0,57	Sofrível
Piracanjuba 2018	SAFER	0,111	0,249	0,14	0,93	0,83	0,77	Muito bom
	METRIC	0,185	0,326	0,18	0,90	0,76	0,69	Bom
Piracanjuba 2019	SAFER	0,010	0,076	0,05	0,99	0,98	0,97	Ótimo
	METRIC	0,029	0,129	0,08	0,98	0,95	0,93	Ótimo
Gameleira de Goiás 2019	SAFER	0,040	0,134	0,07	0,87	0,92	0,80	Muito bom
	METRIC	0,087	0,209	0,11	0,83	0,87	0,72	Bom
Hidrolândia 2019	SAFER	0,063	0,156	0,08	0,92	0,82	0,75	Muito bom
	METRIC	0,089	0,200	0,10	0,93	0,78	0,73	Bom

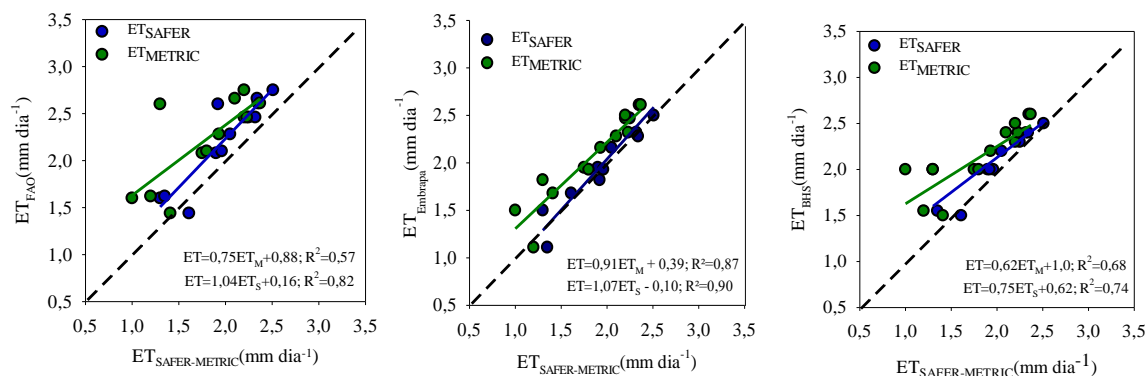
O índice de concordância “d” variou entre 0,64 a 0,99, considerando o SAFER, e 0,57 a 0,97 para o METRIC. Ambos algoritmos tiveram menor índice de concordância ao analisar a área cultivada no município de Silvânia no ano de 2018.

O coeficiente de correlação (r) e o índice de confiança (c), também confirmam o bom desempenho dos algoritmos para estimar a ET_a do tomate para processamento industrial. Todavia, os seus menores valores foram observados para a área analisada em Hidrolândia. Isto pode ter ocorrido devido ao número reduzido de imagens uteis amostradas durante o ciclo da cultura nessa área, o que diminui a robustez dos resultados.

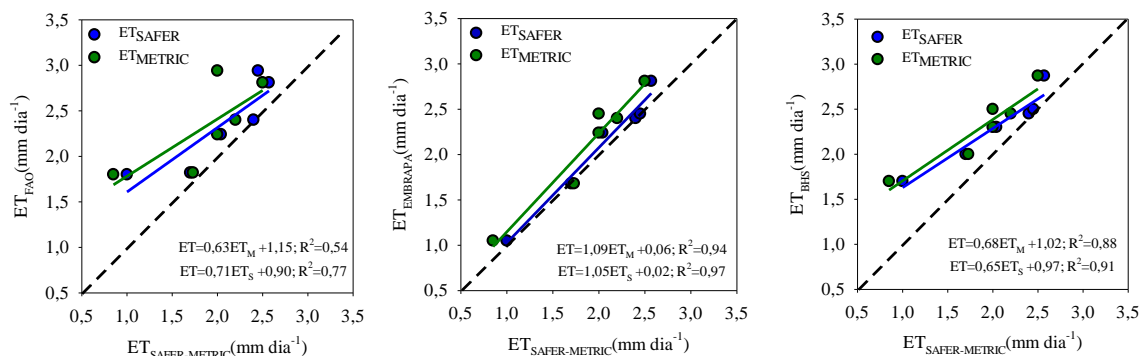
Uma das desvantagens de usar as imagens de satélite na produção agrícola são as suas limitações quanto a frequência de revisita dentro do ciclo da cultura, e a interferência que nuvens provocam no estudo da imagem. Assim, o número reduzido de imagens (amostras) pode diminuir a precisão e exatidão da estimativa de evapotranspiração modelos.

De acordo com os critérios de interpretação do índice de confiança segundo Camargo & Sentelhas (1997) o algoritmo SAFER apresentou 20 (vinte) classificações “Ótimo” e “Muito bom” e o METRIC 12 (doze) classificações, no total de 54 (cinquenta e quatro) propostas taxadas.

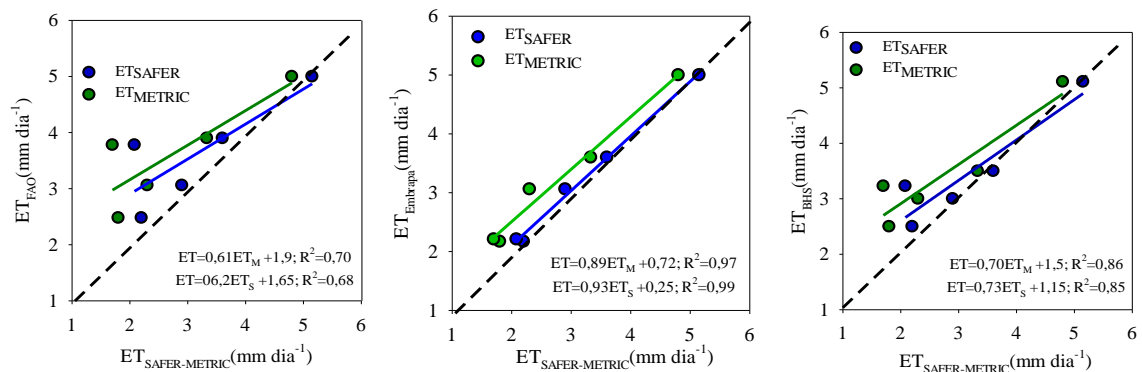
Os baixos valores EQM e EMA, confirmam os altos valores de r, mostrando um alto grau de dependência estatística linear entre as variáveis analisadas, e os altos valores de coeficiente de determinação (R^2) (Figura 3.7).



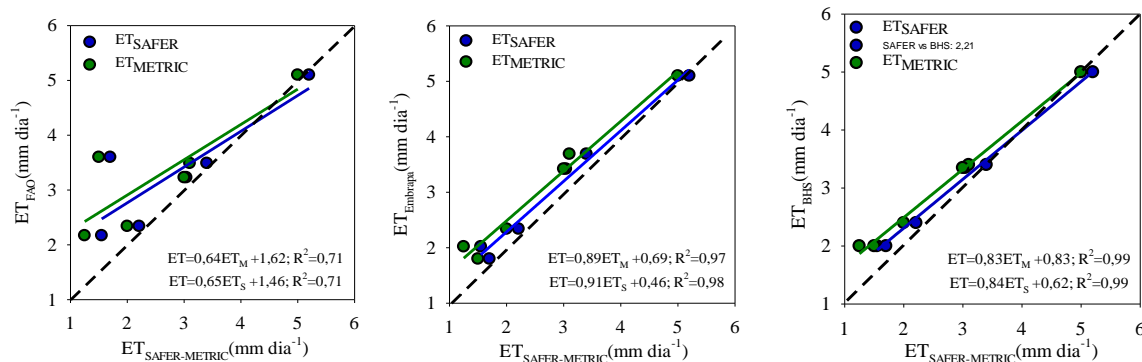
(a) Anápolis -2018



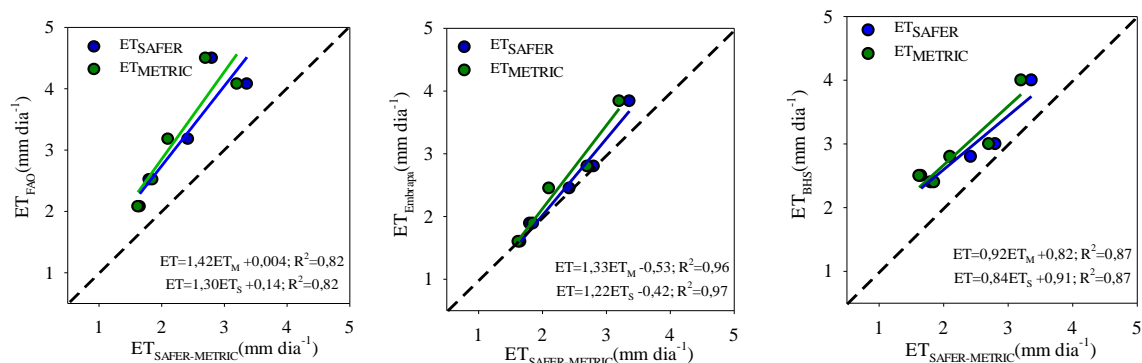
(b) Palmeiras de Goiás -2018



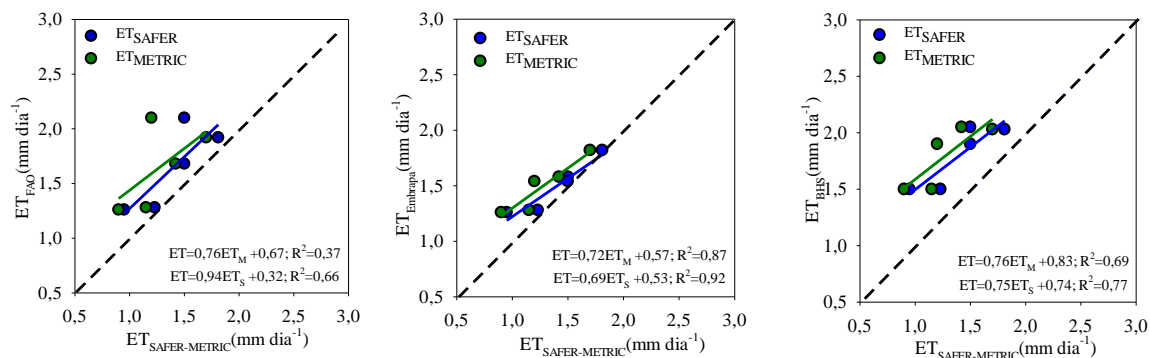
(c) Palmeiras de Goiás -2019



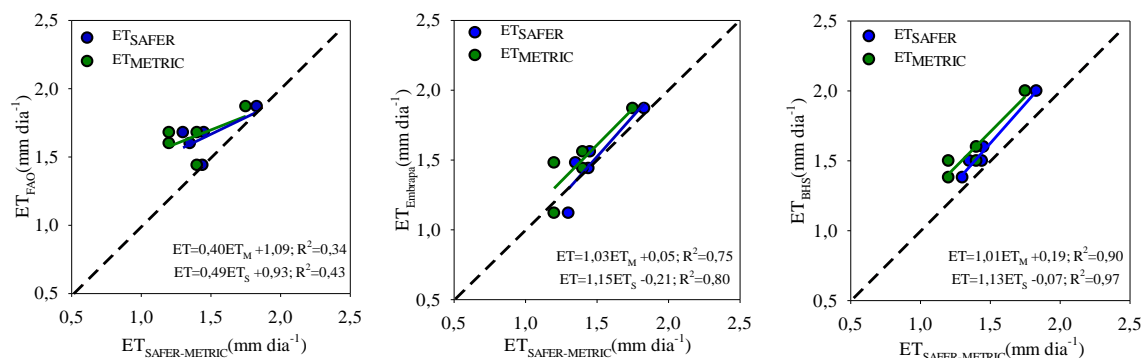
(d) Silvânia -2018



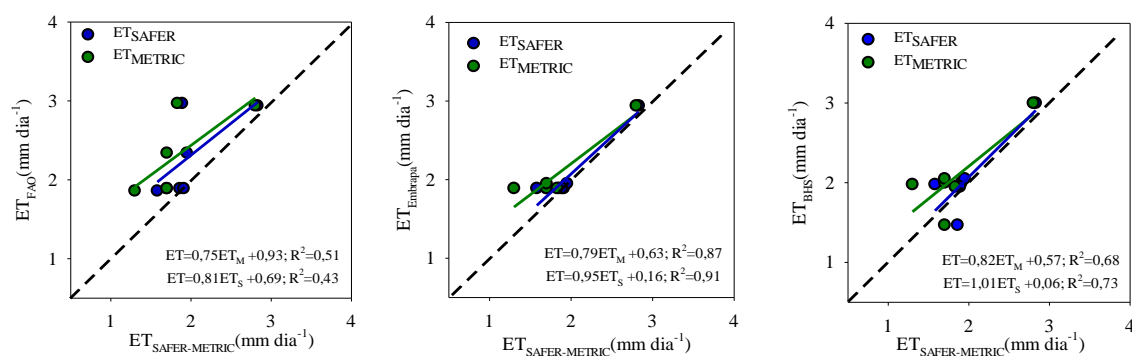
(e) Silvânia -2019



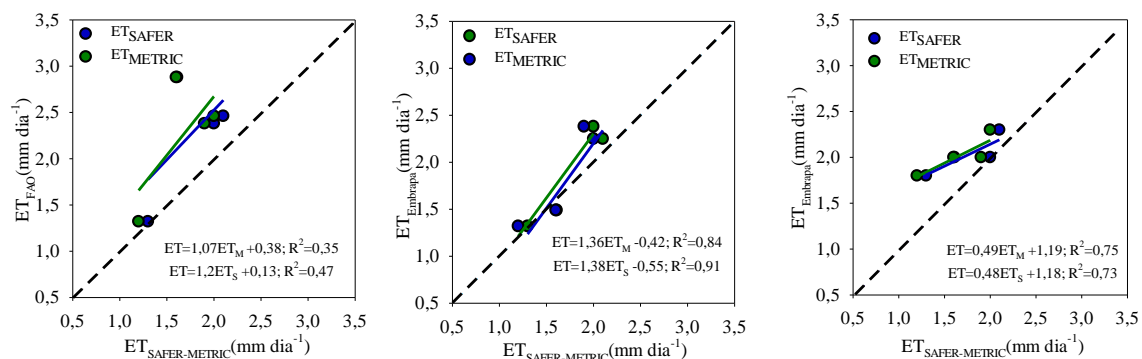
(f) Piracanjuba -2018



(g) Piracanjuba -2019



(h) Gameleira de Goiás -2019



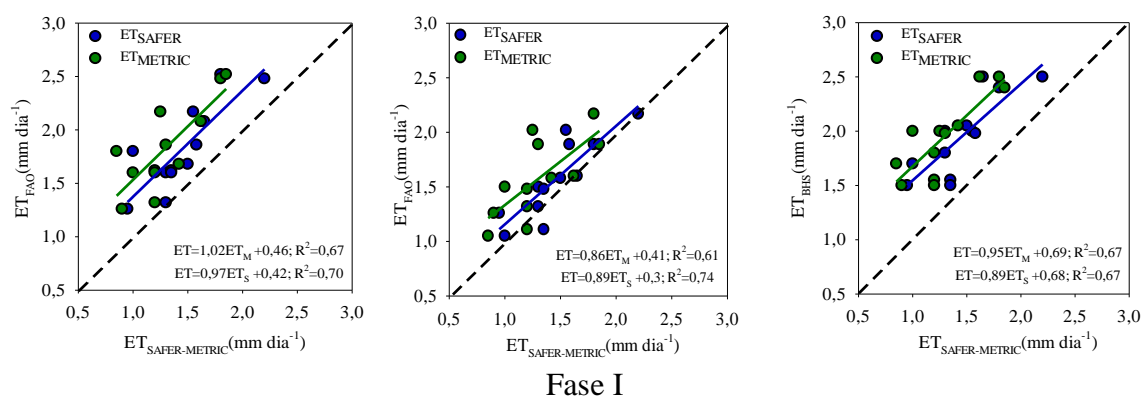
(i) Hidrôlandia -2019

Figura 3.7 Retas 1:1, comparando a evapotranspiração estimada pelo modelo SAFER (ET_{SAFER}), METRIC (ET_{METRIC}) aos métodos padrões FAO (ET_{FAO}), Embrapa (ET_{Embrapa}) e balanço de água no solo (ET_{BHS}).

Reyes-González et al. (2019) ao compararem a ET_a , na cultura do milho, estimada pelo METRIC à determinada pelo actinômetro, observaram que a diferença foi de $1,4 \text{ mm dia}^{-1}$. Os mesmos autores atribuíram essa variação, principalmente, a alta velocidade do vento no momento da passagem do satélite e ao aparelho subestimar essa influência na determinação da ET. Entretanto, o METRIC revelou boa concordância e alto coeficiente de determinação na estimativa da ET_a .

O algoritmo SAFER também apresentou resultados estatísticos satisfatórios na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar (Souza et al., 2020; Mussi et al., 2020), feijão (Sales et al., 2016), milho (Althoff et al., 2019) e tomate para processamento industrial, com erros menores que 1 mm dia^{-1} (Sales et al., 2017). Mostrando assim a aplicabilidade do SAFER em diversas culturas.

Analisando o desempenho dos algoritmos SAFER e METRIC em relação as fases de desenvolvimento do tomate para processamento industrial observa-se que nos estádios vegetativo (Fase II) e de frutificação (Fase III) apresentaram maiores analogias da ET_{SAFER} e ET_{METRIC} com a ET_c estimada pelo BHS, FAO e Embrapa (Figura 3.8). O coeficiente de determinação considerando os dois modelos de estimativa da evapotranspiração obteve média geral de 0,67; 0,89; 0,96 e 0,58 para as fases I, II, III e IV, respectivamente.



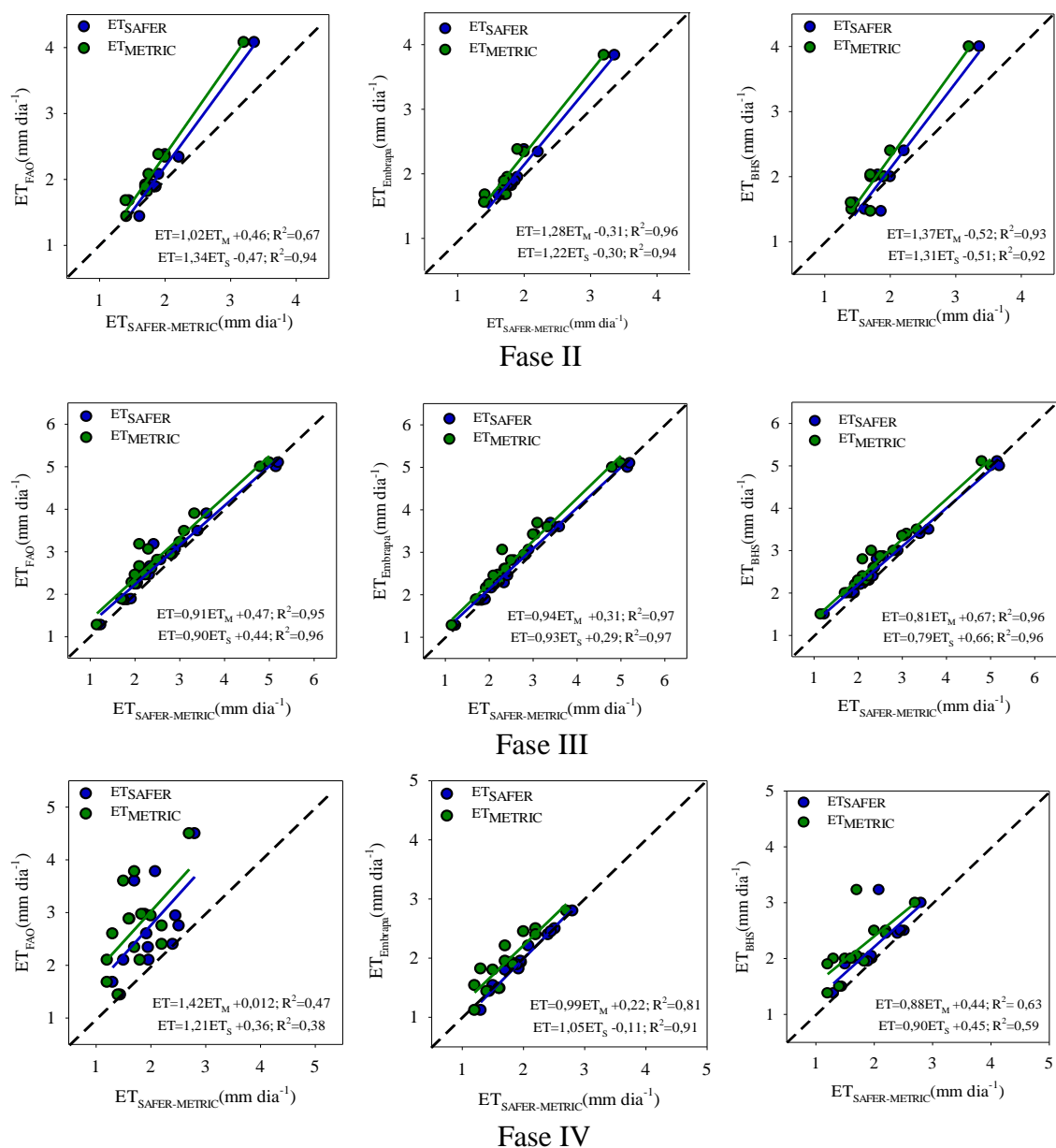


Figura 3.8 Reta 1:1, comparando a evapotranspiração estimada pelo modelo SAFER (ET_{SAFER}), METRIC (ET_{METRIC}) aos métodos padrões FAO (ET_{FAO}), Embrapa ($ET_{Embrapa}$) e balanço de água no solo (ET_{BHS}) em relação aos estádios de desenvolvimento do tomateiro industrial.

Para a fase I o modelo METRIC apresentou menor EQM de 0,136 mm dia⁻¹, com EMA de 0,292 mm dia⁻¹ e d igual a 0,74 classificando-o como “Sofrível” (Tabela 3.9). A fase II o SAFER expôs EQM e EMA mínimo de 0,046 e 0,142 mm dia⁻¹.

Tabela 3.9 Erro quadrado médio (EQM, mm dia⁻¹), erro médio absoluto (EMA, mm dia⁻¹), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de confiança (c) para os valores de evapotranspiração obtidos pelos modelos, SAFER e METRIC, comparando-os aos métodos ET_{FAO}, ET_{Embrapa} e ET_{BHS} em relação aos estádios de desenvolvimento do tomate para processamento industrial.

Modelo		EQM	EMA	r	d	c	Classificação
Fase I							
SAFER	FAO	0,187	0,372	0,83	0,72	0,59	Sofrível
	Embrapa	0,046	0,165	0,85	0,89	0,76	Muito bom
	BHS	0,286	0,496	0,83	0,63	0,52	Sofrível
METRIC	FAO	0,341	0,533	0,79	0,58	0,46	Sofrível
	Embrapa	0,136	0,292	0,72	0,74	0,53	Sofrível
	BHS	0,470	0,658	0,83	0,52	0,43	Sofrível
Fase II							
SAFER	FAO	0,091	0,230	0,98	0,94	0,93	Ótimo
	Embrapa	0,046	0,142	0,99	0,97	0,96	Ótimo
	BHS	0,087	0,233	0,96	0,94	0,90	Ótimo
METRIC	FAO	0,156	0,316	0,99	0,91	0,90	Ótimo
	Embrapa	0,105	0,272	0,98	0,93	0,91	Ótimo
	BHS	0,128	0,297	0,97	0,92	0,89	Ótimo
Fase III							
SAFER	FAO	0,068	0,207	0,98	0,98	0,96	Ótimo
	Embrapa	0,029	0,135	0,99	0,99	0,98	Ótimo
	BHS	0,039	0,167	0,99	0,99	0,98	Ótimo
METRIC	FAO	0,178	0,345	0,97	0,95	0,92	Ótimo
	Embrapa	0,099	0,267	0,99	0,97	0,96	Ótimo
	BHS	0,116	0,298	0,99	0,97	0,95	Ótimo
Fase IV							
SAFER	FAO	0,972	0,755	0,61	0,59	0,37	Péssimo
	Embrapa	0,006	0,051	0,99	0,99	0,98	Ótimo
	BHS	0,129	0,212	0,81	0,85	0,69	Bom
METRIC	FAO	1,384	0,982	0,59	0,53	0,31	Péssimo

Embrapa	0,084	0,242	0,90	0,89	0,81	Muito bom
BHS	0,317	0,438	0,71	0,70	0,50	Sofrível

Para as fases II e III tanto os coeficientes de correlação, os índices de concordância e confiança variaram entre 0,89 e 0,99; obtendo classificação “Ótimo”. Para a fase IV tanto o SAFER quanto o METRIC exibiram classificação “Péssimo” quando comparado a ET_{FAO} , com o METRIC apresentando EQM maior que um. Assim, mostrando que os algoritmos não estimam com precisão a ET, subestimando-o no início e final de ciclo tomateiro industrial.

Para a estimativa da ET_a do tomate, o algoritmo SAFER apresentou-se como uma ferramenta promissora, mostrando sensibilidade as variações das condições do tomate para processamento industrial. A variabilidade temporal da evapotranspiração é importante diante do cenário competitivo dos recursos hídricos, podendo ser utilizada na gestão de bacias hidrográficas, na gestão agrícola e em toda cadeia hidrológica (Rampazo, 2017). Por se tratar de um método que proporciona a variação ao longo do espaço, e baixo custo na obtenção da informação pode se torna mais um amparo para o manejo da irrigação (Souza et al., 2020). Não descartando a necessidade de estações meteorológicas junto a área agrícola e a necessidade de ajuste nos parâmetros da equação (Teixeira et al., 2013a).

O modelo SAFER teve melhor desempenho do que o modelo METRIC na estimativa da ET_a . Os valores da ET_{METRIC} foram inferiores aos valores de ET_a estimados pelo SAFER, que por sua vez subestimou a $ET_{Embrapa}$, ET_{FAO} e ET_{BHS} . Uma das principais diferenças entre os algoritmos é a limitação que a necessidade de utilizar pixels “âncoras” em condições termohidrológicas extremas em uma mesma área para estimar a ET_a provoca ao algoritmo METRIC.

Todavia, ocasiões em que em área de agricultura não há pixels extremos, devido à indesejável incidência de solo exposto, ou ao contrário quando após uma irrigação não se localiza pixel tão quentes facilmente (Jaafar & Ahmad, 2020), ou ainda, quando as áreas analisadas são pequenas e homogêneas e os pixels extremos (frio e quente) apontados podem ser inválidos (Xue et al., 2020).

Entretanto, o modelo SAFER em seu processo de recuperação da ET_a faz necessário o uso dos coeficientes de regressão “a” e “b” recomendados por Teixeira et al. (2013). Esses coeficientes empíricos podem diminuir a eficiência do algoritmo, uma vez que podem variar de acordo com a região e uso do solo. Venancio et al. (2021) usando o SAFER

com coeficientes a igual a 1,8 e b igual 0,008 observaram fraco desempenho para estimar a evapotranspiração em milho irrigado na região do semiárido brasileiro, sendo que a calibração de novos coeficientes ($a = 0,32$ e $b = -0,0013$) melhorou o desempenho do algoritmo para estimativa de ET.

3.4 CONCLUSÕES

- Os resultados apontaram que os algoritmos SAFER e METRIC são capazes de estimar a ET_a do tomate para processamento industrial irrigado por pivô central em regiões do centro-sul goiano.
- Os algoritmos apresentaram boa precisão e acurácia quando comparados aos métodos FAO, BHS e, principalmente, ao da Embrapa para a estimativa da ET_c .
- Nas fases vegetativa e frutificação, os modelos SAFER e METRIC apresentaram os menores valores de erro médio absoluto de $0,24 \text{ mm dia}^{-1}$.
- O SAFER apresentou melhor desempenho estatístico do que o METRIC, entretanto ambos subestimaram a evapotranspiração na cultura do tomate para processamento industrial.

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. **FAO**, Rome, v. 300, n. 9, 1998.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, n. 3-4, p. 251-268, 2005.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Applications. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, Miami, v. 133, n. 4, p. 395-406, 2007a.

ALLEN, R.; 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. 4, p. 380-394, 2007b.

ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 25, n. 26, p. 4011-4027, 2011.

ALTHOFF, F.; ALVINO, F. C. G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 35, n. 3, p. 670-678, 2019.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL - Based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 229, n. 1. p. 87-100, 2000.

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

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.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40-55, 2014.

ELKATOURY, A.; ALAZBA, A. A.; MOSSAD, A. Estimating Evapotranspiration Using Coupled Remote Sensing and Three SEB Models in an Arid Region. **Environmental Processes**, v. 7, n. 1, p. 109-133, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, Produção de Informação, 2013. 353p.

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F. Sensitivity of evapotranspiration estimated by orbital images under influence of surface temperature, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, special issue, p. 23-32, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Water and climate chance**, FAOSTAT. **Database Results**. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/statistics/databases/en/>>. Acesso em: 10 out. 2020.

FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; THORP, K. R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 158, p. 281-294, 2015.

GONZÁLEZ-GÓMEZ, L.; CAMPOS, I.; CALERA, A. Use of different temporal scales to monitor phenology and its relationship with temporal evolution of normalized difference vegetation index in wheat. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, v. 12, n. 2, 026010, 2018.

HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agrometeorological and remote sensing data in the Northwest of Sao Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, Hague, v. 1038, p. 263-270, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola 2017**. v.30, v.4, Abr 2017. Disponível em:<ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/Ispa_201506.pdf>. Acesso em: 22 set. 2020.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 238, 111034, 2020.

KHAND, K.; KJAERGAARD, J.; HAY, C.; JIA, X. Estimating Impacts of Agricultural Subsurface Drainage on Evapotranspiration Using the Landsat Imagery-Based METRIC Model. **Hydrology**, Fort Collins, v. 4, n. 49, p. 1-16, 2017a.

KHAND, K.; NUMATA, I.; KJAERGAARD, J.; VOURLITIS, G. L. Dry Season Evapotranspiration Dynamics over Human-Impacted Landscapes in the Southern Amazon Using the Landsat-Based METRIC Model. **Remote Sensing**, Baseal, v. 9, n. 7, p. 706, 2017b.

KOETZ, M.; MASCA, M. G. C. C.; CARNEIRO, L. C.; RAGAGNIN, V. A.; SENA JÚNIOR, D. G.; GOMES FILHO, R. R. Caracterização agrônômica e °Brix em frutos de tomate industrial sob irrigação por gotejamento no sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 1, p. 14-22, 2010.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Ginger climate classification update. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n.3, p. 259-263, 2006.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2ª edição, 352p, 2012.

LIU, R.; WEN, J.; WANG, X.; WANG, L.; TIAN, H.; ZHANG, T. T.; SHI, X. K.; ZHANG, J. H.; LV, S. H. Actual daily evapotranspiration estimated from MERIS and AATSR data over the Chinese Loess Plateau. **Hydrology and Earth System Sciences**, Potsdan, v. 14, n. 1, p. 47-58, 2010.

MARQUELLI, W. A.; MEDEIROS, M. A.; SOUZA, R. F.; RESENDE, F. V. Produção de tomateiro orgânico irrigado por aspersão e gotejamento, em cultivo solteiro e consorciado com coentro. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 429-434, 2011.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, H. R., SILVA, W. L. C. **Irrigação do tomateiro para processamento**. Brasília: Embrapa Hortaliças, Circular técnica 102. p. 24, 2012.

MUSSI, R. F. M.; ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.; BATTISTI, R. Evapotranspiração da cana-de-açúcar estimada pelo algoritmo SAFER. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 263-278, 2020.

NORMAN, J. M.; BECKER, F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 77, n. 3-4, p. 153-166, 1995.

OLIVEIRA, B. S.; MORAES, E. C.; CARRASCO-BENAVIDES, M.; BERTANI, G.; MATAVELI, G. A.V. Improved Albedo Estimates Implemented in the METRIC Model for Modeling Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration over Agricultural and Natural Areas in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, n. 8, p. 1181, 2018.

RAMPAZO, N. A. **Modelagem da evapotranspiração da cana-de-açúcar por sensoriamento remoto**. 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2017.

REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; RETA-SÁNCHEZ, D.G.; SÁNCHEZ-DUARTE, J. I.; PRECIADO-RANGEL, P.; FORTIS-HERNÁNDEZ, M. Comparison of Leaf Area Index, Surface Temperature, and Actual Evapotranspiration Estimated Using the METRIC Model and In Situ Measurements. **Sensors**, New York, v. 19, n. 8, p. 1857, 2019.

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

SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, J. M. F.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, R. M. Common bean evapotranspiration estimated by orbital images. **African Journal of Agricultural Research**, Ago-Iwoye, v. 11, n. 10, p. 867-872, 2016.

SANTOS, J. E. O.; CUNHA, F. F.; FILGUEIRAS, R.; SILVA, G. H.; TEIXEIRA, A. H. C.; SILVA, F. C. S.; SEDIYAMA, G. C. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 233, 106076, p. 1-8, 2020a.

SANTOS, R. A.; DIVINCULA, J. S.; OLIVEIRA, K. R.; VENANCIO, L. P.; MISSIO, M. F.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F.; ALEMAN, C. C. Remote sensing as a tool to determine biophysical parameters of irrigated seed corn crop. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 41, n. 2, p. 435-446, 2020b.

SENA, C. C.; ALVES JÚNIOR, J.; DOMINGOS, M. V. H.; ANTUNES JUNIOR, E. J.; BATTISTI, R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 17228-17240, 2020.

SENAY, G. B.; FRIEDRICH, M.; SINGH, R. S.; VELPURI, N. M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 185, n. 3, p. 171-185, 2016.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 79, n. 6, p. 1-11, 2019c.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Comparison of SAFER and METRIC-BASED actual evapotranspiration models in a subtropical area of Brazil. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial Inovagri – notas técnicas, v. 1, n. 1, p. 48-55, 2019a.

SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MANZIONE, R. L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling and Software**, Oxford, v. 120, 104497, 2019b.

SOUZA, J. M. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; MESQUITA, M. Validação do modelo SAFER na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 247-262, 2020.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A.; BRAZ, A. J. B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. Estimation of surface reflectance and albedo from satellite for routine, operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrology Engineering**, v. 13, n. 2, 2007.

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. **Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering**, Cardiff, v. 9239, p. 923900-1-923900-10, 2014.

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, 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; p. 154-157, 2012.

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

8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, XIV, v. 8531. p. 1-10, 2012a.

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. 2013. (Documentos, 99).

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. R.; FRANCO, R. A. M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, v. 11, n. 1, 2017.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. C. Sugarcane water productivity assessments in the São Paulo state - Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, Abingdon, v. 6, p. 84-95, 2016.

TEIXEIRA, A. H. C.; PADOVANI, C. R.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; GALDINO, S. Use of MODIS images to quantify the radiation and energy balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing**, Basel, v. 7, n. 11, p. 14597-14619, 2015.

TEIXEIRA, A. H. C.; SCHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F. Large-scale water productivity assessments with MODIS images in a changing semi-arid environment: a Brazilian case study. **Remote Sensing**, Basel, v. 5, n. 11, p. 5783-5804, 2013a.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat Project Description. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php> Acesso em: 05 nov. 2020.

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.

VENANCIO, L. P.; EUGENIO, F. C.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F. F.; SANTOS, R. A.; RIBEIRO, W. R.; MANTOVANI, R. C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application, **Plos one**, San Francisco, v. 15, n. 7, e0235620, 2020.

VENANCIO, L. P.; MANTOVANI, E.C.; AMARAL, C.H.; NEALE, C.M.U.; FILGUEIRAS, R.; GONÇALVES, I.Z.; CUNHA, F.F. Evapotranspiration mapping of commercial corn fields in Brazil using SAFER algorithm. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 78, n.4, e20190261, 2021.

WAGLE, P.; GOWDA, P. H. Editorial for the Special Issue “Remote Sensing of Evapotranspiration (ET)”. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 18, p. 2146, 2019.

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. 7, n. 1, p. 65-82, 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 the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

XIANG, K.; LI, Y.; HORTON, R.; FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 232, n. 3, p. 106043, 2020.

XUE, J.; BALI, K. M.; LIGHT, S.; HESSELS, T.; KISEKKA, I. Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration models against surface renewal in almonds, tomatoes and maize. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 238, 106228, 2020.

4 DIAGNÓSTICO DO MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE TOMATE PARA PROCESSAMENTO INDUSTRIAL EM GOIÁS

RESUMO

O manejo da irrigação praticado pelos produtores de tomate para processamento industrial tem sido feito de maneira empírica, podendo prejudicar a produtividade da cultura como também o uso dos recursos hídricos. Assim, objetivou-se analisar o uso da água de irrigação por pivô central na produção de tomate para processamento industrial, em regiões produtoras de Goiás. Foram monitoradas nove áreas de produção de tomate para processamento industrial durante a safra 2018 e 2019. As lâminas de irrigação aplicadas foram registradas utilizando pluviômetros instalados nas áreas de cultivo, e as demandas hídricas foram estimadas a partir de coeficientes de cultura recomendados pela Embrapa, multiplicado pela evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Montheith. O conteúdo de água no solo foi monitorado na camada de 0-0,5 m. Os resultados mostraram que as demandas hídricas do tomate para processamento industrial variaram de 280,3 a 436,8 mm, em 109 a 129 dias de ciclo. O diagnóstico revelou que em todas as áreas avaliadas ocorreram erros nos manejos de irrigação quando analisado o total de água aplicado no ciclo. O erro médio por excesso de água aplicada foi de 83,4 mm o que representa 77,8% das áreas analisadas, e erro por déficit foi de 39,3 mm o que corresponde 22,2% das áreas analisadas. As fases II e III da cultura do tomate foram as que tiveram menor porcentagem de acerto no manejo da irrigação. O monitoramento conjectura que as irrigações em todas as áreas monitoradas foram realizadas na frequência errada o que pode ter ocasionado escoamento de água na superfície do solo.

Palavra-chave: Uso racional da água; Pivô central; Frequência de irrigação

ABSTRACT

The irrigation management practiced by the producers of processing tomatoes has been done in an empirical way, which can harm the productivity of the crop as well as of the water resources. Thus, the objective was to analyze the use of irrigation water by central pivot in the production of processing tomatoes, in producing regions of Goiás. Nine processing tomato production areas were monitored during the 2018 and 2019 harvest. The applied irrigation depths were recorded using rain gauges installed in the cultivation areas, and the water demands were estimated from the crop coefficients recommended by Embrapa, multiplied by the reference evapotranspiration estimated by the Penman-Montheith method. The water content in the soil was monitored in the 0-0.5 m layer. The results showed that the water demands of the processing tomato varied from 280.3 to 436.8 mm, in 109 to 129 days of cycle. The diagnosis revealed that in all the evaluated areas there were errors in the irrigation management when analyzing the total water applied in the cycle. The average error for excess water applied was 83.4 mm, which represents 77.8% of the analyzed areas, and

deficit error was 39.3 mm, which corresponds to 22.2% of the analyzed areas. Phases II and III of tomato cultivation had the lowest percentage of correctness in irrigation management.

Key words: Rational use of water; Center pivot; Irrigation frequency

4.1 INTRODUÇÃO

A produção de tomate para processamento industrial se destaca no cenário agroindustrial brasileiro, sendo o 12º produto em importância econômica para o agronegócio (Rocco & Morabito, 2016). O Brasil ocupa o oitavo lugar na produção mundial, com mais de 60 mil ha cultivados e produção de mais de 4 milhões de toneladas anuais para fins industriais (IBGE, 2019; WPTC, 2019). O estado de Goiás é o maior produtor, com 70% da produção nacional de tomate para processamento (HORTIFRUTI-CEPEA, 2019), concentrando o cultivo na região centro-sul do estado, em que além das condições edafoclimáticas favoráveis a essa cultura, em relação a outras zonas tradicionais de cultivo no país (Silva Junior et al., 2015), é onde localiza-se mais de dez agroindústrias para processamento.

No Brasil, a irrigação de tomate para processamento industrial é feita principalmente por aspersão, a qual representa 90% da área irrigada, enquanto a irrigação por gotejamento representa 10% (Koetz et al., 2010). No estado de Goiás 100% da cultura é irrigada, e quase toda a produção de tomate para processamento industrial é realizada utilizando-se aspersão por pivô central (Marouelli et al., 2012).

A disponibilidade adequada de água no solo para cultura do tomateiro deve ser mantida durante todo o ciclo, para não limitar o seu crescimento, desenvolvimento e produção de frutos (Marouelli et al., 2012), sendo o déficit hídrico um dos principais fatores de quebra de produtividade do tomateiro (Morales et al., 2015). Por outro lado, o excesso de água pode promover uma menor qualidade do produto para a indústria (Patanè & Cosentino, 2010; Patanè et al., 2011). Assim, conhecer a evapotranspiração máxima da cultura ou a demanda climática ideal de água é fundamental para garantir a sustentabilidade da produção (Barbosa et al., 2020).

O tomateiro é uma das hortaliças mais exigentes em água, com consumo acima da média entre as hortaliças, de 300 a 600 mm (Marouelli et al., 2012). O ciclo do tomateiro pode ser dividido em quatro fases distintas. A primeira fase tem duração de uma a duas semanas, indo do transplante das mudas até o pegamento (início de novas brotações). A segunda fase tem duração de cinco a seis semanas, indo do pegamento ao pleno

florescimento. A terceira fase tem duração de cinco a seis semanas, do florescimento ao início da maturação dos frutos. E a quarta fase, com duração de três a quatro semanas, vai da maturação à colheita. É importante conhecer o início e término das fases possibilitando uma melhor programação da variação de lâmina de irrigação ao longo do ciclo (Clemente & Boiteux, 2012; Marouelli et al., 2012).

As lâminas líquidas de irrigação, ao longo do ciclo, devem ser calculadas pela soma das evapotranspirações diárias da cultura, entre uma irrigação e outra, ou estimadas a partir de evapotranspirações de referência, obtidas de dados meteorológicos locais, e pelos coeficientes de cultura representativos de cada fase fenológica das plantas (Alves Júnior, et al., 2018; Bernardo et al., 2019). Os valores médios de coeficientes da cultura do tomate para processamento industrial são divulgados pela FAO (Allen et al., 1998), e ajustados para a região do Cerrado pela Embrapa (Marouelli et al., 2008; Marouelli et al., 2012).

Porém, o manejo da irrigação atual praticado pela maioria dos produtores de tomate tem sido feito de maneira empírica causando grande impacto aos recursos hídricos (Bonissoni, 2019). Somado a isso, poucas são as pesquisas nessa área, dificultando a modernização do sistema produtivo. Pois, produzindo pouco tomate com muito insumo, leva a produção de alimentos com maior risco de contaminação, gerando impactos ambientais com a lixiviação de insumos (Mendes et al., 2016) e com grande impacto nos recursos hídricos.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisár o uso da água de irrigação na produção de tomate para processamento industrial, em regiões produtoras de Goiás, em áreas com pivô central. Quantificar e qualificar o atual manejo da irrigação praticado pelos produtores, comparando com o manejo recomendado pela Embrapa.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo, clima e sistema de cultivo

O estudo foi realizado em nove áreas localizadas em seis propriedades rurais com cultivo de tomate para processamento industrial em pivô central, no período de fevereiro a outubro de 2018 e de 2019. Detalhes de coordenadas geográficas, altitude e área plantada são apresentados na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1 Coordenadas geográficas, altitude (m) e área analisada (ha) para o diagnóstico do uso da água de irrigação na produção de tomate para processamento industrial em Goiás 2018/2019.

Ref.	Local	Latitude	Longitude	Altitude	Área
A1	Anápolis	16°26'18,07" S	48°50'18,01" O	998	110,0
A2	Gameleira de Goiás	16°38'24,51" S	48°62'01,89" O	950	50,0
A3	Hidrolândia	17°03'30,50" S	49°11'30,00" O	705	100,0
A4	Palmeiras de Goiás	16°41'45,14" S	49°53'04,55" O	670	50,0
A5	Piracanjuba	17°32'34,86" S	48°56'53,60" O	691	100,0
A6	Silvânia	16°45'57,70" S	48°40'05,88" O	950	101,6

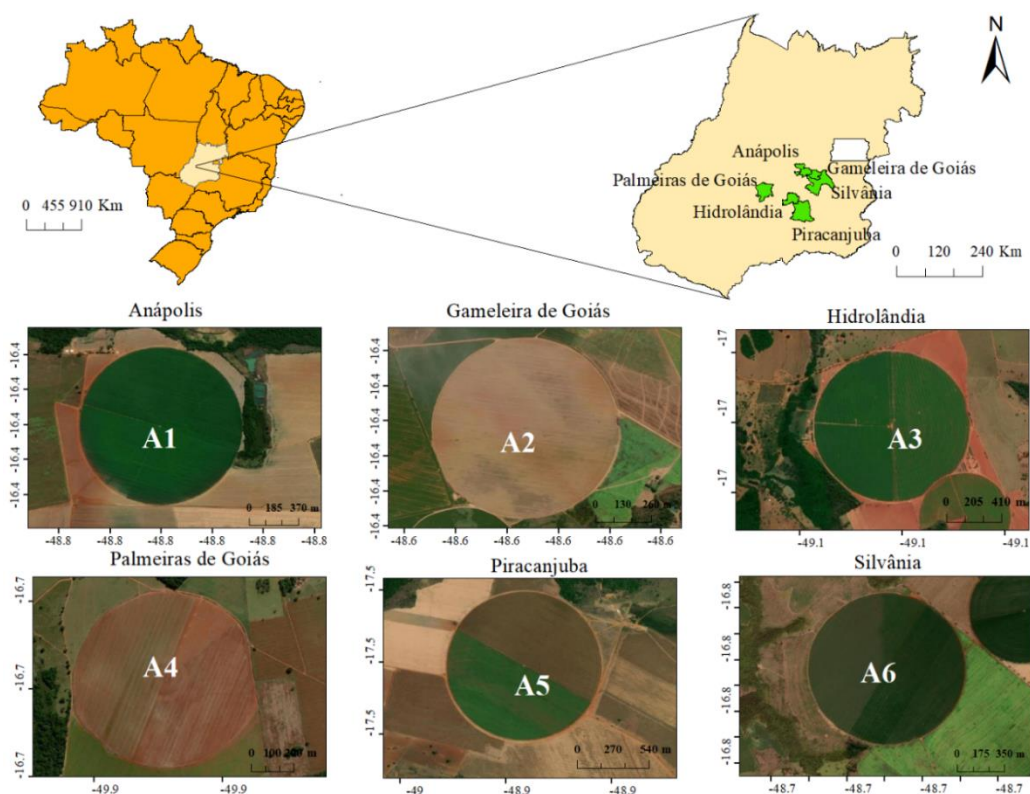


Figura 4.1 Mapa da localização das áreas de estudo.

O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen caracterizada por uma estação chuvosa, compreendida entre os meses de outubro e abril, em que se verifica 90% do total anual precipitado, e outra estação seca, de maio a setembro, com baixos índices de precipitação (Kottke et al., 2006; Cardoso et al., 2014). O solo é classificado como

Latossolo Vermelho Distrófico (Embrapa, 2013). Informações sobre os híbridos utilizados, as datas de transplântio e colheita, produtividade, sólidos solúveis totais e temperatura média do ar e acúmulo térmico durante o ciclo da cultura são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Relação do número de dias do ciclo (Ciclo - Dias), data de transplântio e colheita, temperatura média do ar (Temp. - °C), acúmulo térmico (AT - °C), produtividade (Prod. - t ha⁻¹), sólidos solúveis totais (SST - °Brix) e híbridos utilizados nas áreas analisadas de cultivo de tomate para processamento industrial em Goiás.

Área	Ciclo	Transplântio	Colheita	Temp	AT	Prod.	SST	Híbrido
A1-18	127	15/05/2018	18/09/2018	19,6	1227,8	81,8	4,0	N-901
A2-19	114	23/05/2019	13/09/2019	19,9	1127,1	102,1	4,6	CVR-6116
A3-19	125	29/05/2019	30/09/2019	22,0	1505,2	86,7	4,6	N-901
A4-18	109	06/05/2018	22/09/2018	23,1	1428,9	90,6	4,7	N-901
A4-19	113	17/06/2019	07/10/2019	24,1	1605,0	80,1	4,1	N-901
A5-18	125	23/05/2018	24/09/2018	21,5	1331,0	102,5	4,4	N-901
A5-19	112	26/03/2019	15/07/2019	20,6	1186,7	87,5	4,5	CVR-2909
A6-18	129	08/05/2018	13/09/2018	21,2	1443,8	114,0	4,1	N-901
A6-19	120	16/05/2019	12/09/2019	21,0	1318,4	58,1	4,5	H-9553

O transplântio foi realizado em fileira dupla, com espaçamento de 0,60 m entre linhas, 0,37 m entre plantas, e 1,20 m entre linhas duplas, totalizando, em média, 27000 a 30000 plantas.ha⁻¹. Para as áreas A5-18, A5-19 e A6-18 foram adotados o sistema de plantio convencional, e nas demais áreas analisadas foi empregado o sistema de plantio direto.

Para a adubação de plantio foi aplicado 1,3 ton ha⁻¹ do formulado N-P-K 04-30-16 + 0,2% B + 0,3% Zn + 0,2% Mn, e em cobertura (fertirrigação) aplicou-se 20 kg.ha⁻¹ MAP + 70 kg.ha⁻¹ Sulfato de amônio + 100 kg.ha⁻¹ nitrato de amônio + 250 kg.ha de KCl, seguindo protocolo padrão do departamento agrícola da agroindústria.

4.2.2 Caracterização do solo

Nas áreas A1, A4, A5 e A6 foram determinadas a granulometria e a densidade do solo nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,3 e 0,3-0,5 m, em pontos distribuído equidistantes dentro do pivô central, sendo um ponto para cada três hectares, aproximadamente. As análises foram feitas no Laboratório de Física do solo da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás – Campus Goiânia, seguindo a metodologia da Embrapa (2017).

Os dados de granulometria e densidade do solo foram submetidos a interpolação por meio da ponderação de distância inversa (IDW – inverse distance weighting) (Shepard, 1968; Tunçay et al., 2016) e confeccionadas mapas dos atributos do solo, estes analisados de acordo com os parâmetros limites de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ para densidade, de acordo com Melo et al. (2017), e a classificação textural do solo, de acordo com Lemos & Santos (1982).

A curva de retenção da água no solo foi elaborada utilizando amostras indeformadas de solo. Estas foram submetidas às baixas tensões de 0, 3 e 6 KPa em mesa de tensão e as altas tensões de 10, 33, 60, 100, 500 e 1500 KPa na câmara de pressão de Richards. A curva foi ajustada de acordo com van Genuchten (1980).

4.2.3 Análise da planta

Nas áreas A2, A3, A4-18, A4-19, A5-18, A5-19, A6-18 e A6-19 a cada 16 dias em 10 plantas, escolhidas aleatoriamente ao longo das áreas de produção, foi analisada a temperatura foliar em 10 amostras de folhas do terço médio totalmente exposta ao sol, utilizando termômetro digital infravermelho. Nas áreas A2, A3 e A6-19 foi avaliado o potencial de água na folha utilizando a câmara de pressão de Scholander, e este foi analisado de acordo Thompson et al. (2007), em que o valor crítico de tensão na folha do tomate varia de 0,40 a -0,60 Mpa.

Para o diagnóstico da nutrição das plantas foi realizada a análise de macro (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) nas folhas do tomateiro retiradas no início da frutificação (aproximadamente 65 DAT) no sentido Leste-Oeste da planta, no terço mediano adjacentes à inflorescência (Clemente & Boiteux, 2012).

4.2.4 Diagnóstico da irrigação

Para o monitoramento do conteúdo de água no solo e lâmina de irrigação foram instalados três conjuntos de sensores nas áreas estudadas. Cada conjunto continha um pluviômetro Decagon ECRN-50 e três sensores EC-5 nas profundidades de 0,1, 0,3 e 0,5 m alinhados ao raio do pivô (Figura 4.2), conectados ao data Logger Decagon EM50. Os sensores foram calibrados segundo Sena et al. (2020).

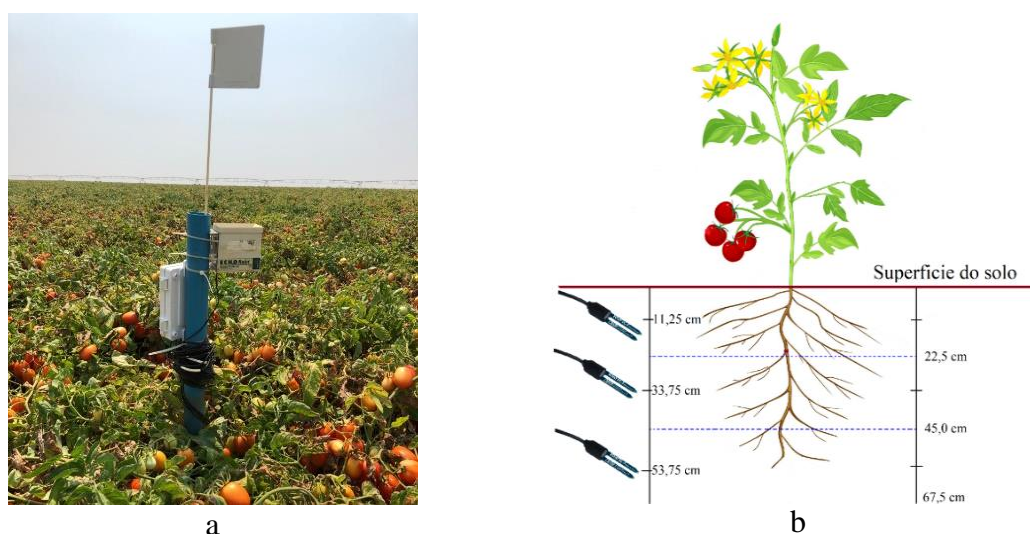


Figura 4.2 a. Bateria de sensores composta por um pluviômetro e três sensores de umidade de solo acoplados a um datalogger; b. Esquema da instalação dos sensores de umidade do solo EC-5 em campo de tomate para processamento industrial.

A evapotranspiração de referência foi determinada por Penman-Monteith (Allen et al., 1998), utilizando dados climatológicos obtidos de estações meteorológicas instaladas a aproximadamente 50 m de cada área monitorada. Para estimativa da evapotranspiração da cultura, utilizou-se valores de K_c recomendados por Marouelli et al. (2012). A profundidade efetiva do sistema radicular da cultura foi obtida em Marouelli & Silva (2002), para cada um dos estádios fenológicos (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 Estádios fenológicos da cultura do tomate para processamento industrial de acordo com o acúmulo térmico (°C), profundidade efetiva radicular e coeficientes de cultura (K_c).

Estádios *	Dias do ciclo (dias)	Acúm. Term. (°C)	Raiz (cm)	K_c Embrapa PC	K_c Embrapa PD
Fase I	8	150	10	0,90-0,80	0,35 – 0,45
Fase II	27	600	20-30	0,65	0,40 – 0,50
Fase III	60	1080	30-40	1,10	0,95 – 1,05
Fase IV	30	1450	40	0,35	0,25 – 0,35

A intensidade de aplicação (I_a) foi calculada conforme a Equação 1.

$$I_a = \frac{2 \times 1000 \times r \times Q}{r^2 \times d} \quad (1)$$

em que: I_a - taxa de aplicação de água no solo (mm h^{-1}); r - distância do centro do pivô ao aspersor final (m); Q - vazão total do pivô central ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$); d - diâmetro do defletor (m).

Calculou-se o tempo gasto pelo pivô para irrigar cada corte de largura igual ao diâmetro molhado do aspersor (18 m). Sendo que, o número de fatias de “pizzas” foi calculado dividindo-se o perímetro da última torre (RUT) pelo diâmetro molhado do último aspersor (Equação 2).

$$T_g = \frac{T}{NP} \quad 60 \quad (2)$$

em que: T_g - tempo gasto do pivô para irrigar um corte (min); T - tempo necessário para o pivô central completar uma volta completa (min); NP - número de cortes a serem irrigadas na área total (Equação 3).

$$NP = \frac{P}{D} \quad (3)$$

em que: NP - é o número total de cortes a serem irrigadas pelo pivô central; P - perímetro última torre (m); e D - diâmetro molhado proporcionado pelo último aspersor (m).

O risco de escoamento de água no solo foi determinado quando a intensidade de aplicação de água na extremidade final de um pivô central apresentou-se maior que a taxa

de infiltração de água no solo. Para os valores de taxa infiltração de água no solo foram usados valores médios recomendados por Fiorin (2008) levando em consideração a granulometria do solo. Assim, para cada equipamento avaliado, foi obtido a regulagem de percentímetro limite para evitar escoamento de água na superfície do solo.

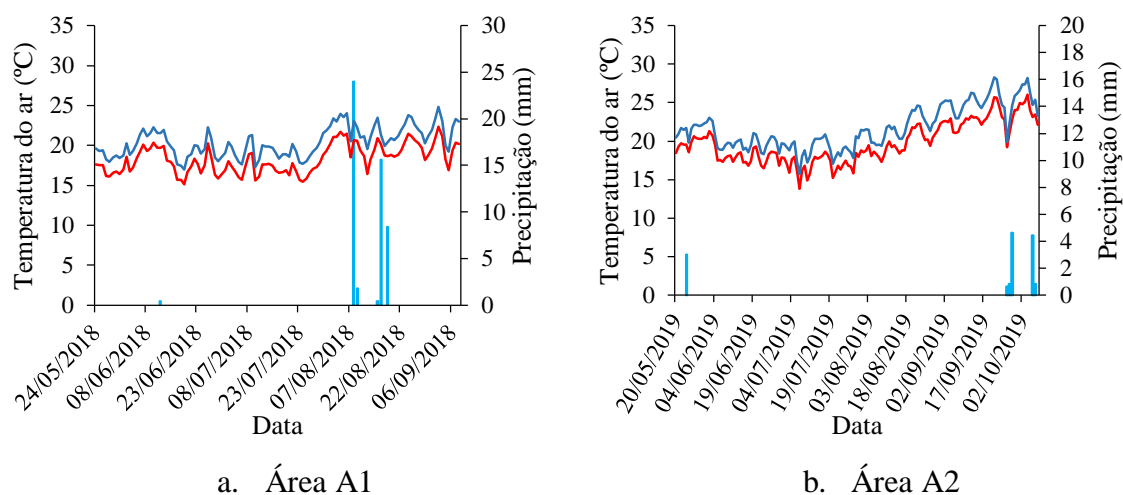
Para a avaliação do diagnóstico da irrigação na produção de tomate para processamento industrial, utilizou-se o critério de interpretação em que os resíduos menores e iguais a 6 mm e os resíduos maiores ou iguais a 6 mm não são considerados erros de irrigação.

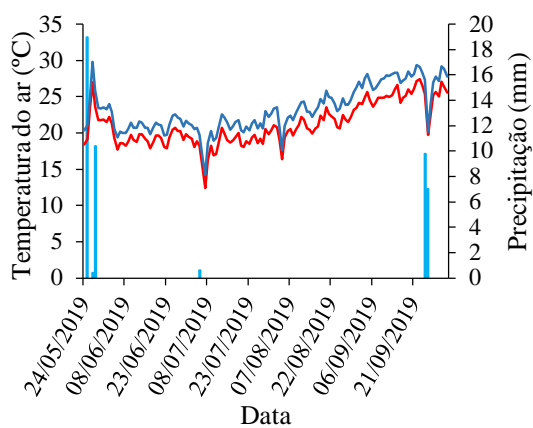
4.2.5 Análise dos dados

Os dados coletados foram analisados de acordo com a estatística descritiva. Para a tabulação, cálculos do diagnóstico da irrigação e confecção dos gráficos foi utilizado o programa MS Excel[®] versão 2014.

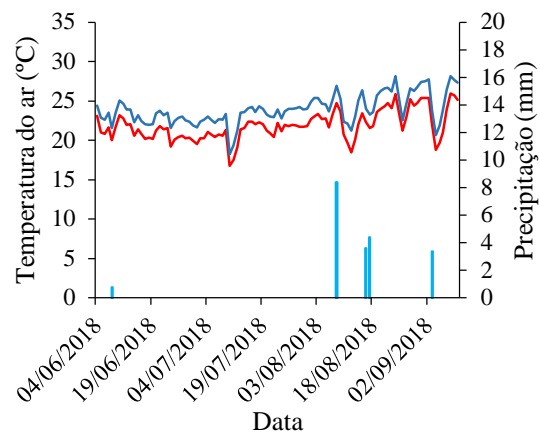
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4.3 apresenta o comportamento climático diário representado pela temperatura do ar máxima e mínima e precipitação pluviométrica observadas nas áreas de produção de tomate para processamento industrial estudadas durante o ano de 2018 e 2019. É possível observar que no início e no final do ciclo houve maior ocorrência da precipitação, sendo que na área A5-19 o volume de chuva durante o ciclo foi de 280,3 mm.

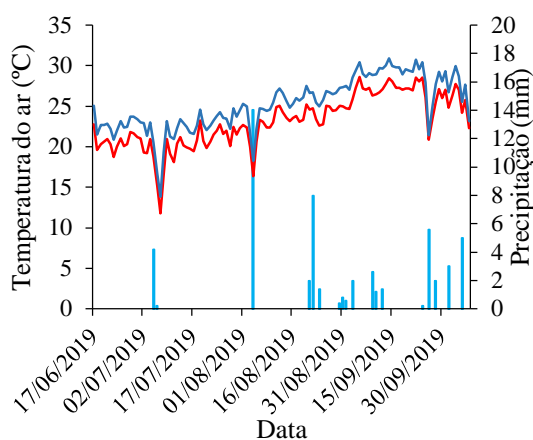




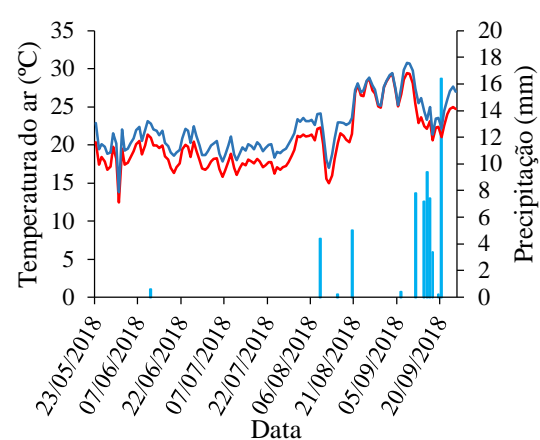
c. Área A3



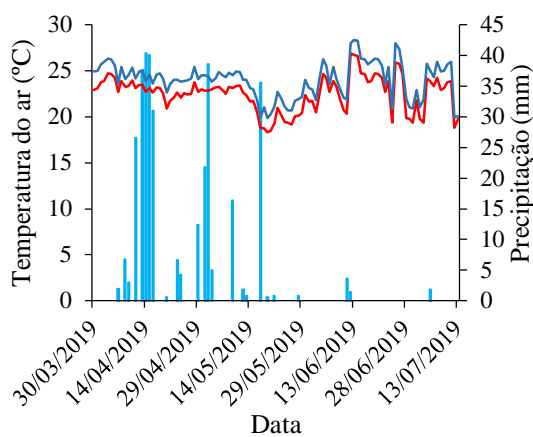
d. Área A4-18



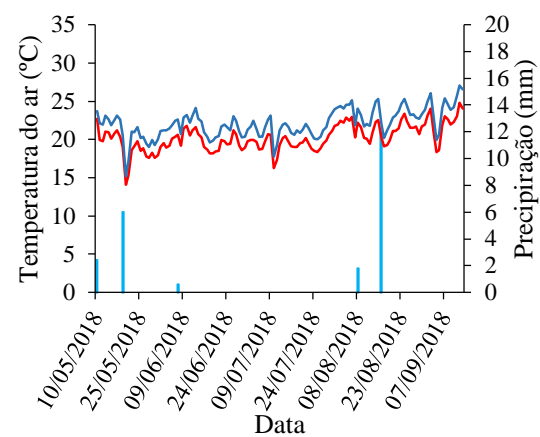
e. Área A4-19



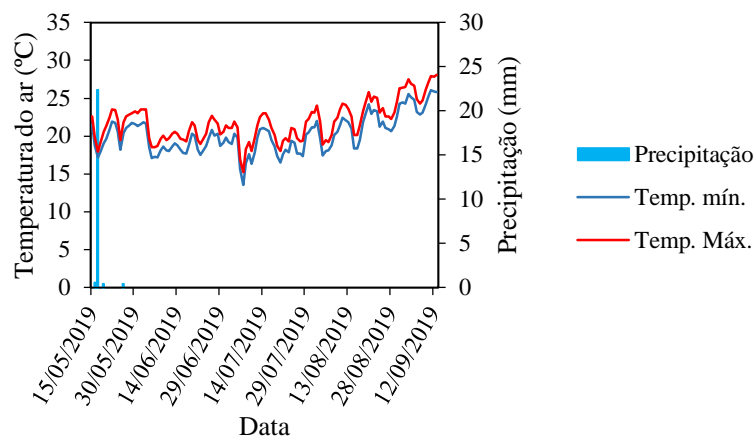
f. Área A5-18



g. Área A5-19



h. Área A6-18



i. Área A6-19

Figura 4.3 Comportamento climático representado pela precipitação pluviométrica (mm), e temperatura do ar máxima e mínima (°C) nas áreas avaliadas de produção de tomate para processamento industrial.

4.3.1 Diagnóstico do manejo da irrigação

A necessidade de irrigação em média geral do tomate para processamento industrial foi de 372,4 mm, com maior demanda de 436,8 mm de água na área A5-18 e menor demanda de 280,3 mm referente a área A5-19 (Tabela 4.4). Esta baixa necessidade hídrica se deve a ocorrência de precipitações durante a Fase II que chegou a 280 mm. Mesmo com episódios de chuvas nas Fases II e III, isso ocorreu em distribuição espaçadas, que repuseram água no solo em quantidades adequadas que substituíram as irrigações; a umidade do solo na zona radicular ao longo desse ciclo manteve-se dentro do intervalo ótimo, mesmo indicando déficit de água na fase III de 16,1 mm, que provavelmente dever ter sido compensado pelo excesso na fase anterior (Anexo 1.7).

Observa-se na Tabela 4.4 que em nenhuma das áreas acompanhadas o manejo da irrigação foi da forma correta (de acordo com o critério estabelecido), visto que ao final do ciclo, ao comparar a necessidade hídrica do tomate para processamento industrial, obtida pela equação padrão indicada pela FAO e com coeficientes da cultura específico para a região (Marouelli et al., 2012), houve déficit ou excesso hídrico. O erro médio por excesso foi de 83,4 mm (77,8% das áreas), e por déficit foi de 39,3 mm (22,2% das áreas). O maior déficit hídrico observado foi de 61 mm na área A6-19 e o maior excedente hídrico foi de 194,3 mm aferido na área A5-19.

Tabela 4.4 Diagnóstico do manejo da irrigação na produção de tomate para processamento industrial em áreas irrigadas por pivô central em Goiás (2018/2019).

Local		Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV	Total
		mm				
A1 (127 dias N-901)	Precipitação	8,0	0,0	47,0	10,8	65,8
	ET _c	37,2	118,9	185,1	35,7	376,9
	Irrigação	42,0	178,0	163,0	3,0	386,0
	Balanço	+12,8	+59,1	+24,9	- 21,9	+74,9
A2 (114 dias CRV 6116)	Precipitação	2,8	0,0	0,0	0,0	2,8
	ET _c	32,8	137,6	181,9	14,0	366,3
	Irrigação	38,0	201,0	105,0	0,0	344,0
	Balanço	+8,0	+63,4	-76,9	-14,0	-19,5
A3 (125 dias N-901)	Precipitação	0,0	0,0	0,0	17,4	17,4
	ET _c	30,6	105,6	140,9	54,8	331,9
	Irrigação	33,0	156,0	133,0	38,0	360,0
	Balanço	+2,4	+50,4	-7,9	+0,6	+45,5
A4 (109 dias N-901)	Precipitação	0,0	0,0	16,0	74,8	90,8
	ET _c	29,2	82,4	149,7	57,0	318,3
	Irrigação	53,0	112,0	94,0	24,0	283,0
	Balanço	+23,8	+29,6	-39,7	+41,8	+55,5
A4 (113 dias N-901)	Precipitação	0,0	0,0	27,4	26,0	53,4
	ET _c	31,1	116,7	147,4	72,4	367,6
	Irrigação	26,0	145,0	120,0	105,0	396,0
	Balanço	-5,1	+28,3	0,0	+58,6	+81,8
A5-18 (125 dias N-901)	Precipitação	0,0	0,0	4,0	53,4	57,4
	ET _c	43,6	148,6	205,1	39,5	436,8
	Irrigação	70,0	219,0	145,0	14,0	448,0
	Balanço	+26,4	+70,4	-56,1	+27,9	+68,6
A5-19 (112 dias CVR-2909)	Precipitação	12,0	280,0	58,6	0,0	350,6
	ET _c	29,5	85,2	131,4	34,2	280,3
	Irrigação	26,0	6,0	64,0	28,0	124,0
	Balanço	+15,5	+200,8	-16,1	-6,2	+194,3
A6-18 (129 dias N-901)	Precipitação	8,9	0,0	13,7	0,0	22,6
	ET _c	37,1	123,9	184,3	72,2	417,5
	Irrigação	35,0	144,0	198,0	81,0	458,0
	Balanço	+6,8	+20,1	+27,4	+8,8	+63,1
A6-19 (120 dias H-9553)	Precipitação	26,2	0,0	0,0	0,0	26,2
	ET _c	32,4	129,9	191,4	54,5	408,2
	Irrigação	11,0	118,0	140,0	52,0	321,0
	Balanço	+4,8	-11,9	-51,4	- 2,5	-61,0

*Fase I: Transplântio até o pegamento das mudas (acúmulo térmico de 150 GD); Fase II: Pegamento das mudas até o pleno florescimento (600 GD); Fase III: Florescimento até o início da maturação (1080 GD); Fase IV: Maturação até a colheita (1450 GD). (+) Excesso e (-) déficit hídrico.

Ao analisar o balanço hídrico por fase, de forma geral, nota-se que nas duas primeiras fases a produção do tomate para processamento industrial apresentaram maior

número de excedentes hídricos do que déficit hídrico. O maior excedente hídrico para essas fases variou de 2,4 mm (A3) a 200,8 mm (A5-19). O excedente hídrico ocorrido nas três primeiras fases, sobretudo nas fases II e III, pode ter proporcionado perdas de nutrientes por lixiviação (Espinoza e Reis. 1984; Albuquerque et al., 2011), afetando sua disponibilidade para a planta e favorecendo um ambiente favorável ao ataque de patógenos (Santos et al., 2002).

O déficit hídrico aplicado na fase final do ciclo pode ser considerado uma técnica desejável na produção de tomate para processamento industrial (Marouelli et al., 2012), todavia o déficit hídrico de 21,9 mm ocorrido na área A1 pode ter comprometido a fisiologia e o metabolismo da cultura o que promoveu baixa produtividade 81,86 t ha⁻¹ e qualidade de produção de 4,04 °Brix com o híbrido N-901.

O uso de déficit hídrico como um método de maximização da produção por unidade de água aplicada é bem visto no manejo da irrigação de tomate, pois está relacionado ao desenvolvimento/crescimento do sistema radicular no tomateiro, uniformidade de maturação e, principalmente, a qualidade do fruto (Marouelli & silva, 2007; Pantané et al., 2011; Ripoll et al., 2014; Cantore et al., 2016; Silva Junior et al., 2018). Entretanto, o déficit hídrico deve ser gerenciado para que a aplicação da água por irrigação em quantidade abaixo da máxima demandada seja compatível com a capacidade de retenção de água no solo na zona radicular da cultura, seja aplicado no período correto e que não interfiram significativamente no desenvolvimento e crescimento da cultura (Chen et al., 2013; Viol et al., 2017; Bernardo et al., 2019).

Avaliando o diagnóstico da irrigação, observou-se que a fase I, teve-se 33,4% de acerto na irrigação e 66,7% (15,5 mm) de áreas com erro por excesso com nenhum por déficit. Na fase II, observou-se 88,9% (65,2 mm) de erro por excesso e 11,1% (11,9 mm) de áreas com de erro por déficit e nenhum acerto. Na fase III, teve-se 11,1% de acerto na irrigação, 22,2% (26,1 mm) de erro por déficit, e 66,7% (41,3 mm) de erro por excesso nas áreas avaliadas. Na fase IV, teve-se 33,4% de acerto na irrigação, 44,4% (44,4 mm) de erro por excesso e 22,2% (17,9 mm) de erro por déficit nas áreas.

De acordo com Chen et al. (2014) a produção e qualidade do fruto de tomate não tem sensibilidade ao déficit hídrico orientado durante a fase I da cultura, entretanto a ocorrência de déficit hídrico nas fases II e III podem apresentar queda na produção e na qualidade do fruto quanto ao teor de sólidos solúveis. Em razão de que a escassez de água durante o período de floração pode ocasionar abortamento de flores e durante o período de

formação dos frutos pode ocasionar redução do seu peso (Jensen et al., 2010; Zheng et al., 2013).

Na área A6 com monitoramento da irrigação na produção de tomate para processamento industrial durante o ciclo de 2018 (A6-18) a necessidade hídrica da cultura foi de 417,4 mm (129 dias) e para o ciclo de 2019 (A6-19) foi de 408,2 mm (120 dias). Embora cultivado híbridos diferentes (N-901 e H-9553) sem correlação atestada de produtividade (114,04 t ha⁻¹ e 58,17 t ha⁻¹) e qualidade do fruto (4,12 °Brix e 4,52 °Brix), a demanda hídrica padrão foram semelhantes, no entanto, com o diagnóstico do balanço hídrico verificou-se que o manejo da irrigação foram equivocadas e antagônicas, de modo que no primeiro ciclo (A6-18) houve excedente de 63,1 mm e no segundo ciclo (A6-19) déficit de 61 mm. Esse fato elucidou o fato que o manejo da irrigação é feito erroneamente tendendo à aplicação de água tanto em excesso quanto em deficiência.

4.3.2 Frequência de irrigação e risco de escoamento de água na superfície do solo

A Tabela 4.5 apresenta a lâmina líquida de irrigação média, máxima, mínima e bruta para todas as áreas e ciclos estudados e o risco de escoamento de água na superfície do solo. A lâmina média de irrigação líquida aplicada durante os dois anos de monitoramento em todas as áreas analisadas foi de 10,82 mm, variando de 6,0 mm (A6-19) a 14,3 mm (A2-19).

A intensidade de aplicação de água, na extremidade final, de cada pivô analisado variou de 53,0 mm h⁻¹ (A2-19) a 75,9 mm h⁻¹ (A5-18 e A5-19). Tendo por base esses dados, observamos que em todas as áreas, exceto a A6-18 e A6-19, a aplicação da lâmina líquida média e máxima pode ter acarretado o escoamento de água no solo.

Tabela 4.5 Risco de escoamento de água no solo em função das lâminas de irrigação, intensidades de aplicação de água nas extremidades finais dos pivôs centrais, e regulagem mínima do percentímetro para evitar o escoamento.

Pivô	Vazão	Área	Tempo 100%	Lâmina 100%	Raio Total	Raio até última torre	Diâmetro molhado (Final)
	$m^3 \cdot h^{-1}$	ha	H	mm	m	m	m
A1	398,6	110,0	13,57	5,41	591,8	571,8	18
A2	190,4	50,0	10,10	3,85	399,0	379,0	18
A3	385,4	100,0	13,75	5,24	564,3	544,3	18
A4-18	335,3	103,0	12,24	4,64	572,6	552,6	18
A4-19	201,7	53,0	10,10	3,85	410,8	390,8	18
A5	385,4	100,0	13,75	5,24	564,3	544,3	18
A6	276,5	101,6	11,39	3,1	568,5	548,5	18
Pivô		Lâmina Líquida	Lâmina Bruta	Regulagem Percent.	Tempo / volta	Intensidade Aplicação	Escoamento de água no solo
		mm	mm	R%	h	Mm h ⁻¹	R% mínima
A1	Méd.	11,0	12,94	41,80	32,46	74,8	(sim)
	Máx.	23,0	27,06	19,99	67,87		59% (sim)
	Mín.	5,0	5,88	91,97	14,75		(Não)
A2	Méd.	14,3	16,81	22,90	44,11	53,0	(Sim)
	Máx.	31,0	36,47	10,56	95,68		33% (sim)
	Mín.	4,0	4,71	81,81	12,35		(Não)
A3	Méd.	9,4	11,04	47,46	28,97	75,9	(Sim)
	Máx.	15,0	17,65	29,69	46,31		63% (sim)
	Mín.	5,00	5,88	89,08	15,44		(Não)
A4-18	Méd.	11,3	13,3	23,3	48,8	65,1	(Sim)
	Máx.	23,0	27,06	11,46	99,3		43% (sim)
	Mín.	5,0	5,88	52,72	21,6		(Não)
A4-19	Méd.	14,1	16,60	23,20	43,54	54,5	(Sim)
	Máx.	27,0	31,76	12,12	83,33		35% (sim)
	Mín.	4,0	4,71	81,81	12,35		(Não)
A5-18	Méd.	10,6	12,52	41,85	32,86	75,9	(Sim)
	Máx.	20,0	23,53	22,27	61,74		63% (sim)
	Mín.	5,0	5,88	89,08	15,44		(Não)
A5-19	Méd.	9,4	11,04	47,46	28,97	75,9	(Sim)
	Máx.	15,0	17,65	29,69	46,31		63% (sim)
	Mín.	5,0	5,88	89,08	15,44		(Não)
A6-18	Méd.	11,3	13,3	23,3	48,8	54,0	(Não)
	Máx.	23,0	27,06	11,46	99,3		28% (sim)
	Mín.	5,0	5,88	52,72	21,6		(Não)
A6-19	Méd.	6,0	7,06	74,23	18,52	54,0	(Não)
	Máx.	19,0	22,35	23,44	58,66		28% (sim)
	Mín.	3,0	3,53	148,47	9,26		(Não)

*Tempo e lâmina 100%: tempo mínimo e lâmina mínima por volta.

O número de irrigações média por ciclo foi de 35 (Anexo 1), variando entre 13 irrigações ocorridas na área A5-19 e 53 irrigações para a área A6-18. Apesar de muitas aplicações, apenas 32,5% foram realizadas erroneamente, ou seja, mais da metade das irrigações não provocaram escoamento de água no solo pois as lâminas utilizadas foram menores do que lâmina máxima recomendada para que isso ocorresse. Nas demais áreas a porcentagem de erro na aplicação de água variou entre 8% (A6-19) e 48% (A3).

De acordo com Moraes et al. (2019), solos argilosos são mais susceptíveis a escoamento superficial da água de irrigação, principalmente em sistema de pivô central de 100, 75 e 50 ha, pois áreas com textura pesada diminui a capacidade de infiltração de água no solo, diminuindo a taxa de aplicação de água pelo sistema, logo, o pivô central tem a característica de aumentar a intensidade de aplicação com o aumento do comprimento do equipamento, ocasionando o escoamento superficial. Estes indicam o uso de defletores do tipo I-wob para melhor distribuição da água na área.

Quanto menor a capacidade de infiltração do solo, menor deverá ser a lâmina aplicada por vez, ou seja, maior deverá ser a velocidade de deslocamento do pivô e frequência de irrigação (Nakawuka et al., 2014). Com isso a curva de precipitação do pivô não atingirá a velocidade de infiltração de água no solo, evitando o escoamento superficial (Bernardo et al., 2019).

Na Tabela 4.6 observa-se a evapotranspiração média da cultura do tomate, em cada estágio fenológico, e frequência máxima de irrigação recomendada para evitar o escoamento de água no solo. A frequência de irrigação para o cultivo de tomate para processamento industrial variou entre 1 e 6 dias. A média de frequência máxima de irrigação é de 3, 2 e 4 dias para a fase II, III e IV, respectivamente.

Tabela 4.6 Evapotranspiração média da cultura do tomate para processamento industrial em cada estágio fenológico, e frequência máxima de irrigação recomendada para evitar o escoamento de água no solo.

Local/Fase	Lâmina bruta máxima (mm)	ET _c média (mm dia ⁻¹)				Frequência máxima (dia)			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
A1	9,2	2,1	2,3	3,9	3,0	-	4	2	3
A2	11,7	3,3	2,5	4,2	4,6	-	4	2	2
A3	8,3	2,2	2,2	3,7	2,1	-	3	2	3
A4-18	10,8	2,4	2,7	4,2	2,4	-	4	2	4
A4-19	11,0	2,4	2,9	4,9	2,4	-	3	2	4
A5-18	8,3	2,7	3,0	4,8	2,3	-	2	1	3
A5-19	8,3	3,0	2,6	2,5	1,2	-	3	3	6
A6-18	11,1	2,6	2,9	4,2	2,6	-	3	2	4
A6-19	11,1	2,3	2,8	4,3	3,0	-	4	2	3

Ainda de alguns estudos mostrarem que a frequência de irrigação não influencia estatisticamente na produtividade (Franca et al., 2017; Ferreira et al., 2019). Basílio et al. (2019) analisando dois híbridos de tomateiro (BRS Sena e Heinz 9553) apontaram que maiores intervalos de irrigação proporcionam menor incidência de frutos podres e maior incidências de frutos verdes, independentemente do híbrido analisado. Mas que o manejo da frequência de irrigação específico para cada híbrido é a melhor alternativa para o aumento da produtividade total.

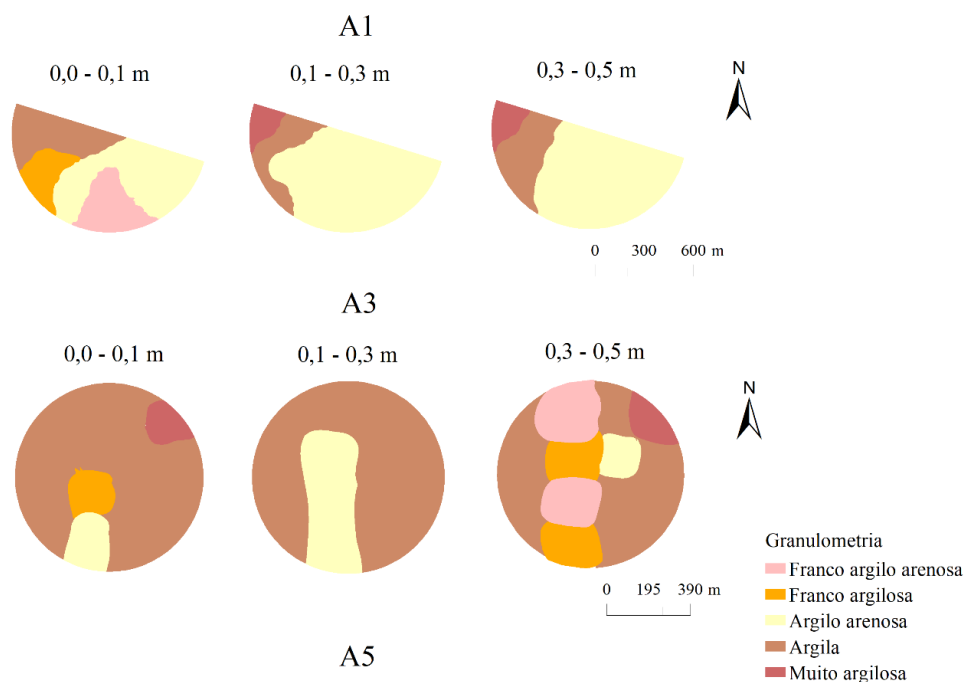
De acordo com Marouelli et al. (2012), em solos com textura média para uma profundidade da raiz do tomate para processamento industrial de 0,30 m e evapotranspiração da cultura média de 4 mm dia⁻¹, o turno de rega adequado para a cultura no estágio inicial e frutificação é de 4 dias, e para os estágios vegetativo e de maturação, de 6 dias. Bezerra et al. (2017) ao analisarem a influência da frequência de irrigação no custo da produção de tomate para processamento industrial constataram que em sistema radicular de 0,50 m pode reduzir pela metade o número de eventos de irrigação nas fases III e IV, reduzindo em até 27% o número de pulverizações de fungicidas durante o ciclo da cultura, o que repercute na redução de 5,67% do custo da produção.

Quanto ao número de irrigação realizadas, ao longo do ciclo, estas variaram entre 55 (A6-19) e 13 (A5-19) aplicações. Se a lâmina aplicada na área A1 fosse a lâmina mínima não do total de 36 irrigação realizadas (Anexo 1.1).

4.3.3 Características do solo

O conhecimento das propriedades físicas do solo como a textura, estrutura, densidade e porosidade são fundamentais para áreas irrigadas, já que esses atributos influenciam expressivamente a infiltração da água no solo (Drewry et al., 2020). A infiltração da água é um critério aplicado tanto no manejo quanto na elaboração de projetos de irrigação, em razão de poder determinar a intensidade e o volume de lâmina máxima que o solo suporta de modo que não ocorra o escoamento superficial (Nakawuka et al., 2014; Bernardo et al., 2019).

Na média geral, os solos das áreas estudadas foram classificados como argissolo (Lemos & Santos, 1982). De acordo com as análises realizadas, a área A1 é constituída de 75% argilo arenosa, 20% argilosa e 5% muito argilosa. A área A4-19 é constituída de 85% argilosa, 5% argilo arenosa, 5% franco argilosa e 5% franco argilo arenosa. A Área A5-19: 80% argilosa, 15% argilo arenosa e 5% franco argilosa. A área A6-19: 60% argilosa e 40% argilo arenosa (Figura 4.4).



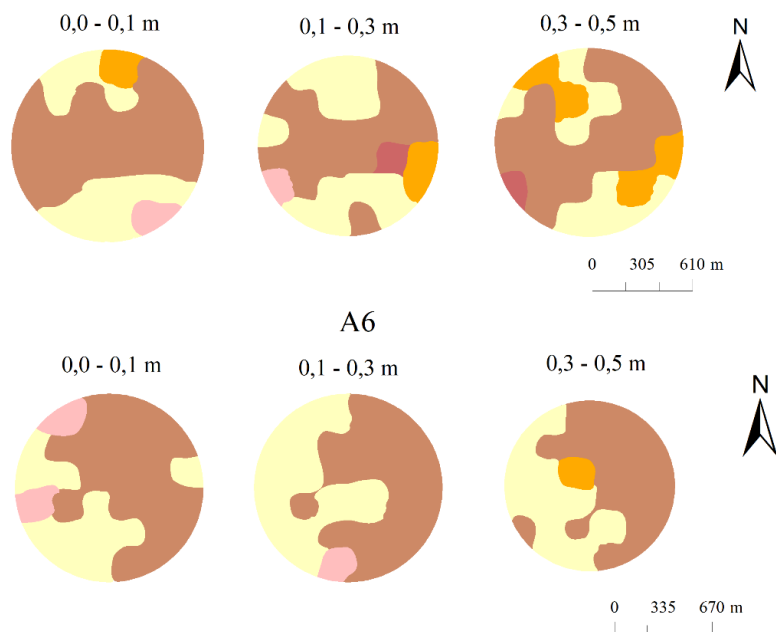
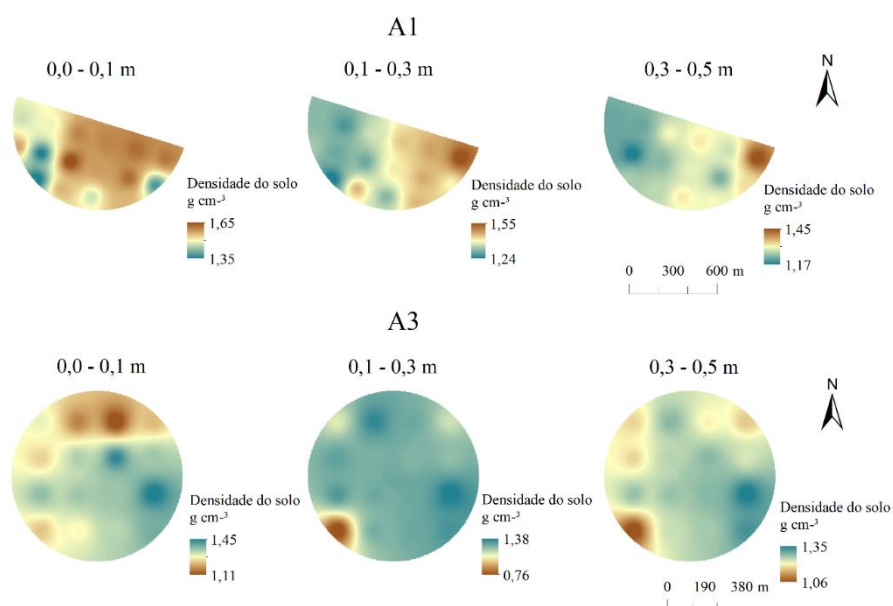


Figura 4.4 Distribuição espacial da granulometria do solo nas camadas de 0,0 – 0,1; 0,1 – 0,3; e 0,3 – 0,5 m.

Na Figura 4.5 apresenta-se a distribuição espacial da densidade do solo nas áreas avaliadas. Na área A4-19 não detectou solos com densidade maior que $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ no perfil 0 – 0,50, apresentando densidade média de $1,32 \text{ g cm}^{-3}$, com densidades máximas menores que $1,44 \text{ g cm}^{-3}$.



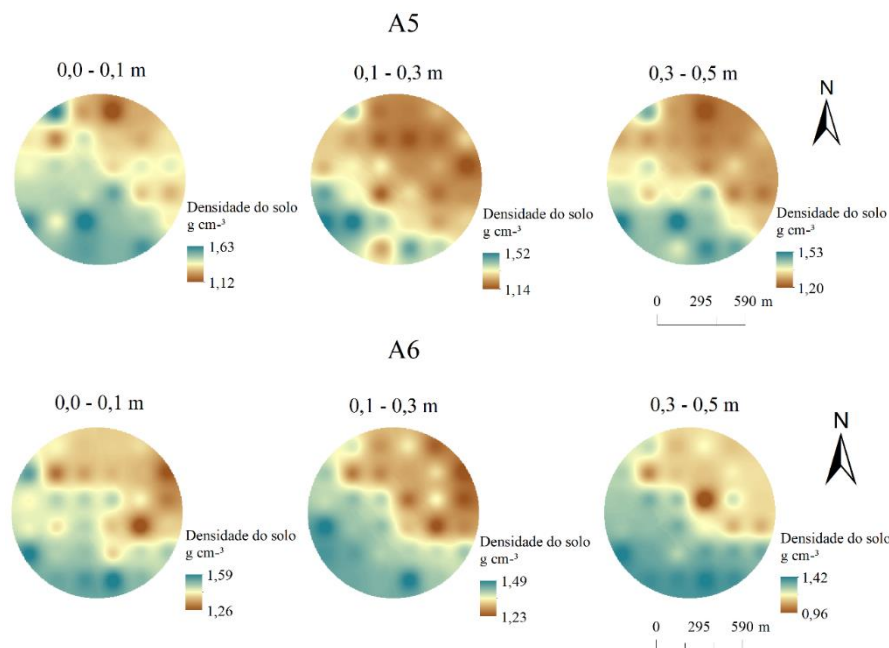


Figura 4.5 Distribuição espacial da densidade do solo nas camadas de 0,0 – 0,1; 0,1 – 0,3 e 0,3 – 0,5 m.

Na área A1 a camada de 0,0 – 0,10 m, apresentou maiores valores de densidade do solo, excedendo $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ valor limite para indicação de necessidade de correção do solo (Melo et al., 2017). Valores acima do tolerado ($1,50 \text{ g cm}^{-3}$) também foram observados em alguns pontos nas três camadas na área A5-19 e nas camadas de 0,0 -0,1 m e 0,1 – 0,30 m na área A6-19.

A densidade do solo funciona como índice de compactação e é usado para avaliar a estrutura do solo, quanto maior a densidade maior é o índice de compactação daquele solo. O aumento da densidade do solo, diminui a quantidade de macroporos, que por sua vez interfere na taxa e na velocidade de infiltração de água no solo, e os valores críticos da densidade dependem da textura do solo. Solo argiloso apresenta maior densidade do solo do que solo arenoso, sob as mesmas condições (Libardi, 2012; Bernardo et al., 2019).

A densidade do solo argiloso varia entre 0,9 a $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, de franco-argiloso de 1,41 e $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ e de arenoso pode variar de 1,3 a $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ (Diebold, 1954; Carvalho et al., 2011). Solos com textura fina (argilosos) possuem menor quantidade de macroporos comparado com solos arenosos, o que pode interferir na taxa e velocidade de infiltração e na disponibilidade de nutrientes para a planta, o que conseqüentemente afeta o desenvolvimento e produtividade da cultura, devido a redução da absorção de água e nutrientes pelas raízes (Girardello et al., 2014; Oliveira et al., 2018).

A cobertura do solo também influencia a infiltração de água, sobre tudo ao evitar o processo de escoamento superficial (Bertollo e Levien, 2019). De acordo com Oliveira et al. (2013) os resíduos vegetais presentes na superfície do solo retarda o início do escoamento superficial e reduz a taxa de escoamento superficial.

4.3.4 Análise fisiológicas da cultura

As análises químicas foliares na cultura do tomate para processamento industrial apontaram que em todas áreas a quantidade de nitrogênio (N) estavam acima do valor mínimo recomendado e que os valores do magnésio (Mg), boro (B), ferro (Fe) e manganês (Mn) ficaram dentro da faixa ideal para a cultura, de acordo com Fontes (2000). O cálcio (Ca) e o enxofre (S) apresentaram teores acima do indicado em uma e quatro áreas estudadas, respectivamente (Tabela 4.7).

Tabela 4.7. Análise química foliar do tomateiro industrial (Goiás – 2019).

Área	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	— dag kg ⁻¹ —						— mg kg ⁻¹ —				
A2	4,84	0,25	1,76	3,0	0,4	1,10	98,36	160,0	150,0	150,0	43,66
A3	4,72	0,28	3,16	3,0	0,4	1,24	114,32	340,0	180,0	200,0	32,91
A4-19	4,36	0,59	1,54	2,0	0,4	0,67	56,43	34,0	260,0	130,0	18,71
A5-19	3,82	0,28	1,70	3,0	0,4	1,16	128,01	60,0	160,0	110,0	25,58
A6-19	3,63	0,20	2,80	4,0	0,4	1,16	110,46	490,0	210,0	230,0	23,21

*Recomendação de Fontes, (2000): macronutrientes (dag kg⁻¹) foram: N, 4,0 - 6,0; P, 0,3-0,6; K, 3-5; Ca, 1-3; Mg, 0,4-0,6 e S, 0,5-1, e micronutrientes (mg kg⁻¹): B, 30-100; Cu, 15-730; Fe, 40-200; Mn, 40-250 e Zn, 20-50.

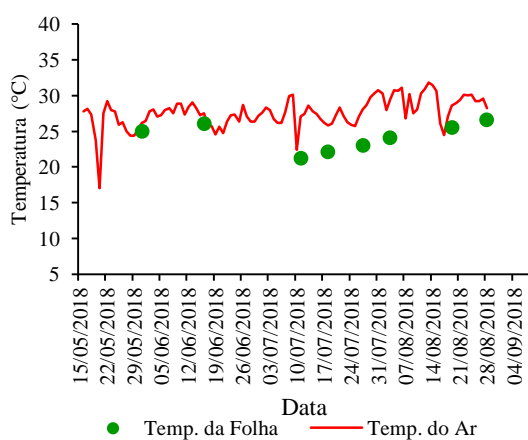
Quantidades baixas de fósforo (P) e potássio (K) foram encontrados em mais da metade das áreas analisadas. E na área A4-19 o nutriente Zinco (Zn) apresentou-se abaixo do recomendado (Fontes, 2000).

As faixas de suficiência (metodologia DRIS) para se obter altas produtividades de tomate para processamento industrial (produtividade entre 108 e 176 t ha⁻¹) apontado por Nowaki (2017) para os macronutrientes (dag kg⁻¹) foram: N, 4,0 - 4,7; P, 0,28 - 0,40; K, 2,1 - 3,1; Ca, 1,0 - 2,4; Mg, 0,51 - 0,68 e S, 0,41 - 0,77, e micronutrientes (mg kg⁻¹): B, 25 - 38; Cu, 76 - 210; Fe, 174 - 341; Mn, 122 - 207 e Zn, 55 - 115. Nessa perspectiva o desequilíbrio nutricional foi mais acentuado, pois Mg, B, Fe e Mn, também estariam fora da taxa ideal para a cultura.

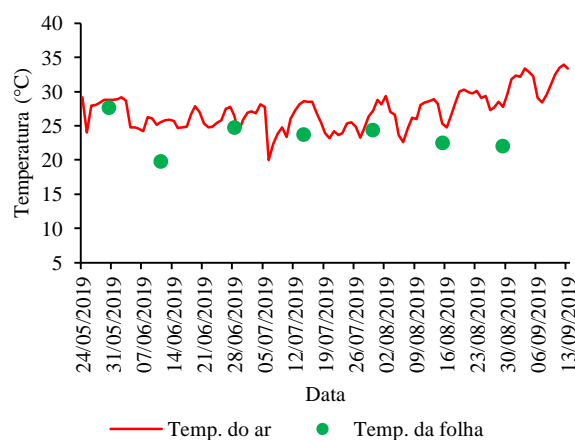
A contradição entre as faixas de valores de macro e micronutrientes consideradas adequadas para cultura está sujeito a fatores como a época do cultivo, obtenção da amostra, tolerância de cada cultivar, variação nos atributos químicos, físicos e mineralógicos de cada solo, das condições meteorológicas, sistema de produção, manejo da irrigação (Silva et al., 2012). Fatores abióticos como a falta ou excesso de água podem confundir o diagnóstico de deficiência ou toxidez de nutrientes na planta, podendo esses fatores causar deficiência tanto por dificultar a absorção de nutrientes como por provocar sintomas semelhantes aos de deficiência (Bastos et al., 2013).

O nitrato e o potássio apresentam alta mobilidade no solo, e por isso lixiviações facilmente ocorrem pelo excesso de água no solo, mesmo no período seco com erros no manejo da irrigação (Mendes et al., 2016). Em condições de baixa disponibilidade hídrica as plantas absorvem menor quantidade de nutrientes por ocorrer diminuição no transporte por fluxo de massa (Vurukonda et al., 2016) e, conseqüente, quebra na produtividade.

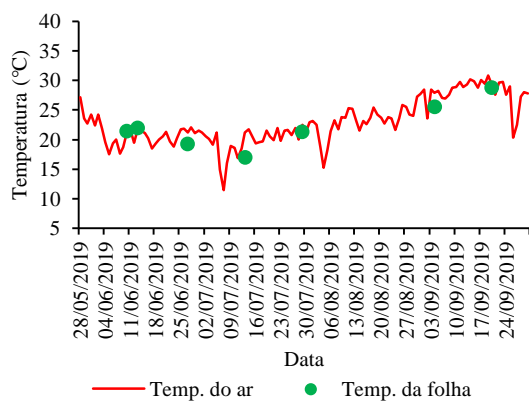
Na Figura 4.6 estão expostas os valores da temperatura foliar referentes as áreas estudadas de produção de tomate para processamento industrial. O déficit hídrico pode alterar o comportamento fisiológico da cultura. Como forma de resposta ao déficit hídrico, a planta pode como forma de conter energia, fechar seus estômatos e a taxa de transpiração é reduzida, aumentando assim a temperatura da folha sendo este um sinal de estresse hídrico. Em nenhuma área monitora a temperatura média foliar foi maior que a temperatura média do ar, apontando que o déficit hídrico o qual a cultura foi submetida em algumas fases e áreas analisada não foi capaz de estressar a planta.



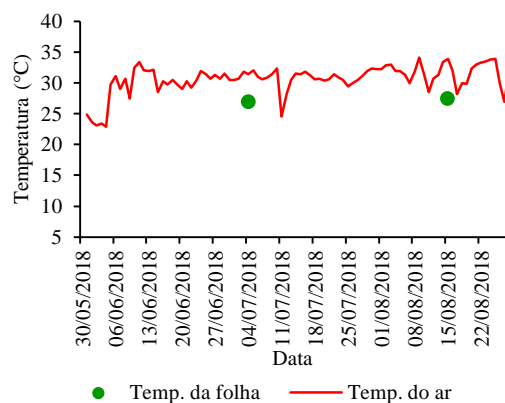
(a) Área A1



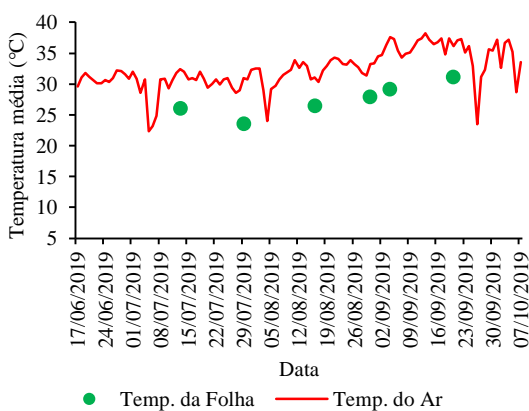
(b) Área A2



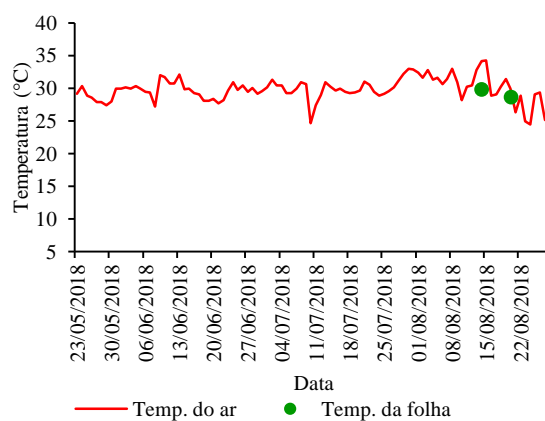
(c) Área A3



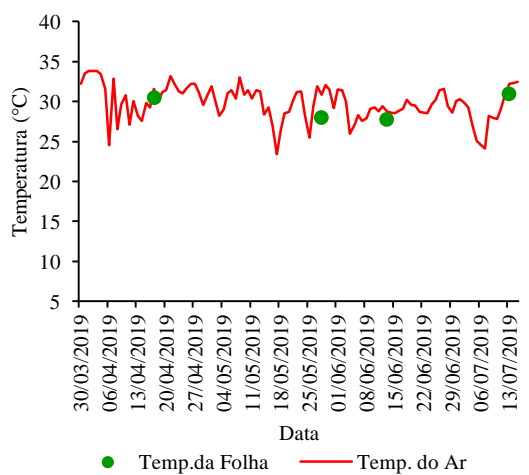
(d) Área A4-18



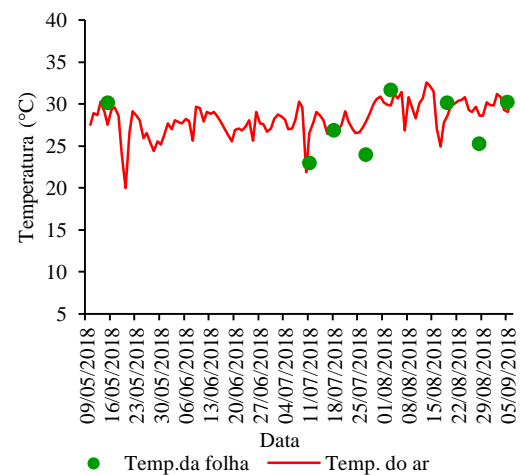
(e) Área A4-19



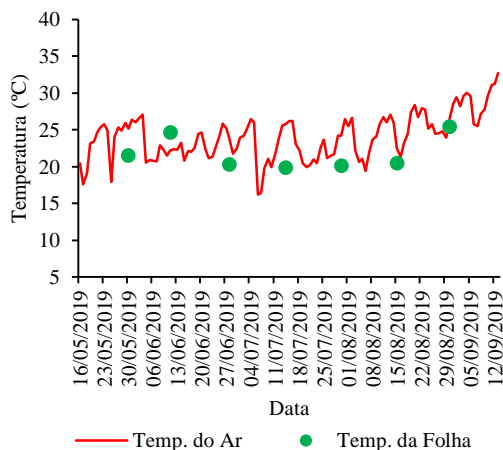
(f) Área A5-18



(g) Área A5-19



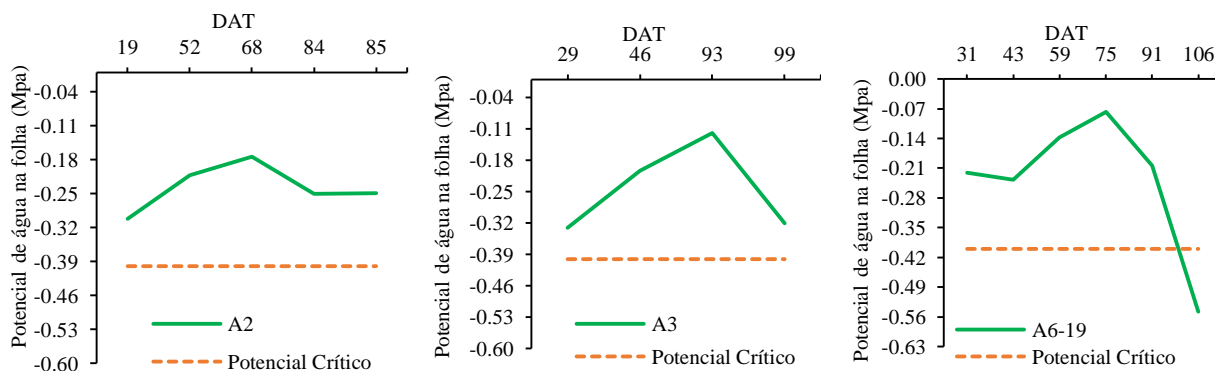
(h) Área A6-18



(i) Área A6-19

Figura 4.6 Temperaturas foliares do tomateiro industrial e temperatura média do ar (°C).

O potencial de água na folha também é um parâmetro que pode expressar a situação hídrica da cultura. Nas áreas A2, A3 e A6-19 de acordo com o exposto na Figura 4.7 e com base nos valores críticos sugeridos por Thompson et al. (2007) estas áreas não apresentaram potencial de água crítico.



(a) Área A2

(b) Área A3

(c) Área A6-19

Figura 4.7 Potencial de água na folha (Mpa) do tomateiro industrial.

4.5 CONCLUSÕES

- O estudo apontou que o uso da água de irrigação no tomate para processamento industrial, em todas as áreas avaliadas, foi manejado de forma incorreta, quando analisado o ciclo total da cultura e comparado ao método de $ET_0.K_C$.

- O erro médio por excesso de água aplicada foi de 83,4 mm, o que ocorreu em 77,8% das áreas analisadas, e o erro por déficit foi de 39,3 mm, o que corresponde 22,2% das áreas analisadas.
- A fase do cultivo em que o manejo da irrigação teve maior porcentagem de erro foram a fases vegetativa e de frutificação.
- Os dados inferiram que em todas as áreas monitoradas as irrigações foram realizadas na frequência errada, com os equipamentos pivôs centrais operando abaixo da velocidade mínima permitida, o que pode ter ocasionado escoamento de água na superfície do solo.

4.6 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, F. S.; SILVA, E. F. F.; SOUZA, A. E. R.; ROLIM, M. M. Lixiviação de potássio em um cultivo de pimentão sob lâminas de irrigação e doses de potássio. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 3, p. 135-144, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO**, Rome, v. 300, n. 9, 1998.

ALVES JÚNIOR, J.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.; MESQUITA, M. Irrigação por aspersão: orientações práticas para o planejamento e elaboração de projetos. In: MEDINA, G. (Org) **Agricultura Familiar em Goiás**. 4. ed. UFG, 2018, cap. 6, p.143-185.

BARBOSA, E. A. A.; BERUSKI, G. C.; SCHIEBELBEIN, L. M.; PEREIRA, A. B. Agrometeorologia para otimização da irrigação em sistemas agrícolas. In. RIBEIRO, J. C.; SANTOS, C. A. (Orgs) **Competência Técnica e Responsabilidade Social e Ambiental nas Ciências Agrárias**. 4. ed. Atena, 2020, cap.14. p. 122-137.

BASÍLIO, E. E.; GOLYSNKI, A.; GOLYNSKI, A.A.; SILVA, C.J.; OLIVEIRA, D. S.; DIAS, R.F. Intervalos de irrigação no cultivo de tomateiro para processamento. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 4, p. 676-692, 2019.

BASTOS, A. R. R.; ALVARENGA, M. A. R.; CARVALHO, J. G.; PINHO, P. J. Nutrição mineral e adubação. In: ALVARENGA, M. A. R. **Tomate**: produção em campo, casa de vegetação e hidroponia. 2. ed. Ver. e ampl. 2013, cap. 5, p. 63-130.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. Viçosa: Editora Universidade Federal de Viçosa, 9. ed. 2019, p. 545.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em sistema de plantio direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 25, n. 3, p. 208-218, 2019.

BEZERRA, R.S.; JOSÉ ALVES JUNIOR, J.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.; MESQUITA, M. Influência da frequência de irrigação no custo de produção do tomateiro industrial irrigado por aspersão. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 8, n. 1, p. 10-17, 2017.

CANTORE, V.; LECHKAR, O.; KARABULUT, E.; SELLAMI, M. H.; ALBRIZIO, R.; BOARI, F.; STELLACCI, A. M.; TODOROVIC, M. Combined effect of deficit irrigation and strobilurin application on yield, fruit quality and water use efficiency of “cherry” tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 167, n. 6, p. 53-61, 2016.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40-55, 2014.

CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; CAVALIERI, K. M. V.; SANTOS, C. F. B. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Fortaleza, v. 15, n. 9, p. 940-949, 2011.

CHEN, J. K.; DU, T.; QIU, R.; GUO, P.; CHEN, R. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 129, n. 1, p. 152-162, 2013.

CHEN, J.; KANG, S.; DU, T.; GUO, P.; QIU, R.; CHEN, R.; GU, F. Modeling relations of tomato yield and fruit quality with water deficit at different growth stages under greenhouse condition. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 146, n. 3, p. 131-148, 2014.

CLEMENTE, F. M. V. T.; BOITEUX, L. **Produção de Tomate para processamento industrial**. Brasília: Embrapa. 2012. 344 p.

DIEBOLD, C. H. Permeability and intake rates of medium textured soils in relation to silt content and degree of compactation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 18, n. 3, p. 339-343, 1954.

DREWRY, J. J.; CARRICK, S.; PENNY, V.; HOULBROOKE, D.J.; LAURENSEN, S.; MESMAN, N. L. Effects of irrigation on soil physical properties in predominantly pastoral farming systems: a review. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 63, n. 1, p. 1-25, 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, Produção de Informação, 2013. 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 3. ed. Ver. e ampl. 2017, 212 p.

ESPINOZA, W.; REIS, A. E. O. Lixiviação em latossolo vermelho-escuro de cerrado ii. Magnitude e variabilidade do fenômeno sob irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 1, p. 85-94, 1984.

FERREIRA, E. D.; VIOL, M. A.; CARVALHO, J. A.; GONTIJO, M. L.; REZENDE, F. C.; LIMA, E. M. C. Tomate Sweet grape cultivado com diferentes lâminas e frequências de irrigação em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 13, n. 3, p. 3402-3411, 2019.

FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. 2008. 97 f. Tese (Doutorado em Ciências do solo: Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FONTES, R. R. **Solo e nutrição da planta**. Tomate para processamento industrial. SILVA, J. B. C.; GIORDANO, L. de B. (Orgs). Brasília: EMBRAPA, 2000. p. 22-35.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Water and climate chance**, FAOSTAT. **Database Results**. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/statistics/databases/en/>>. Acesso em: 10 set. 2020.

FRANCA, R. J. F.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; CAMPECHE, L. F. S. M. Produtividade do tomate cereja em ambiente protegido e céu aberto em função das lâminas e intermitências de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 2, p. 1364-1370, 2017.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 12334-1244, 2014.

HORTIFRUTI/CEPEA. **Custo de produção de tomate em Goiânia (GO)**. Goiás é o principal polo produtor e processador do fruto no Brasil. 01/07/2019. Revista Hortifruti Brasil. Disponível em: <<https://www.hfbrasil.org.br/br/hortifruti-cepea-custo-de-producao-de-tomate-em-goiania-go.aspx>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. IBGE, 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa>>. Acesso em: 17 ago. 2020.

JENSEN, C. R.; BATTILANI, A.; PLAUBORG, F.; PSARRAS, G.; CHARTZOULAKIS, K.; JANOWIAK, F.; STIKIC, R.; JOVANOVIC, Z.; LI, G.; QI, X.; LIU, F.; JACOBSEN, S. E.; ANDERSEN, M. N. Deficit irrigation based on drought tolerance and root signalling in potatoes and tomatoes. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 3, p. 403-413, 2010.

KOETZ, M.; MASCA, M. G. C. C.; CARNEIRO, L. C.; RAGAGNIN, V. A.; SENA JÚNIOR, D. G.; GOMES FILHO, R. R. Caracterização agrônômica e °Brix em frutos de tomate industrial sob irrigação por gotejamento no sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 1, p. 14-22, 2010.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Ginger climate classification update. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de método de trabalho de campos: sociedade brasileira de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Rio de Janeiro. Embrapa-SNLCS. 1982. 36 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2. Ed., 2012, 352 p.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R.; SILVA, W. L. C. **Irrigação do tomateiro para processamento**. Brasília: Embrapa, 2012. 22p. (Embrapa, Circular Técnica 102).

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil. **Irrigation Science**, New Yourk, v. 25, n. 4, p. 411-418, 2007.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R.; BRAGA, M. B. Irrigação e fertigação. In: CLEMENTE, F. M. V. T.; BOITEUX, L. S. (Ed.). **Produção de tomate para processamento industrial**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2012. cap. 6, p. 130-154.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade de água, aspectos do sistema e método prático de manejo**. 2. ed. Revista atualizada e ampliada - Brasília - DF. Embrapa Hortaliças e Embrapa Informação Tecnológica, 2008, 150 p.

MELO, R. A. C.; RAGASSI, C. F.; INOUE-NAGATA, A. K. **Compactação de solo em sistemas de produção de tomate industrial – métodos para identificação e alternativas de manejo**. Brasília: Embrapa Hortaliças. 44 p. 2017. (Documentos 158).

MENDES, W. C., ALVES JUNIOR, J., CUNHA, P. C. R., SILVA, A. R., EVANGELISTA, A. W. P., CASAROLI, D. Nitrate and potassium leaching and the response of the common bean to different irrigation blades. **African Journal of Agricultural Research**, Ago-Iwoye, v. 11, n. 34, p. 3188-3196, 2016.

MORAES, D. H. M.; ALVES JÚNIOR, J.; MESQUITA, M.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D.; BATISTTI, R. Simulation of the Occurrence of Water Runoff in Soils Under Cultivation of Industrial Tomato Irrigated by Center Pivot. **Journal of Agricultural Science**, Ottawa, v. 11, n. 7, p. 48-59, 2019.

MORALES, R. G. F.; RESENE, L. V.; BORDINI, I. C.; GALVÃO, A. G.; REZENDE, F. C. Caracterização do tomateiro submetido ao déficit hídrico. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 16, n. 1, p. 09-17, 2015.

NAKAWUKA, P.; OKWANY, R. O.; PETERS, T. R.; DESTA, K.; SADEGHI, S. H. Efficacy of boom systems in controlling runoff under center pivots and linear move

irrigation systems. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 30, n. 5, p. 797-801, 2014.

NOWAKI, R. H. D. **Padrões para avaliação do estado nutricional do tomateiro para indústria**. 2017. 223 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.

OLIVEIRA, D. G.; REIS, E. F.; MEDEIROS, J. C.; MARTINS, M. P. O.; UMBELINO, A. S. Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial. **Revista AgroAmbiente**, Boa vista, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2018.

OLIVEIRA, Z. B.; CARLESSO, R.; MARTINS, J. D.; KNIES, A. E.; SANTA, C. D. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 415-425, 2013.

PATANÈ, C.; COSENTINO, S. L. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 1, p. 131-138, 2010.

PATANÈ, C.; TRINGALI, S.; SORTINO, O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 129, n. 4, p. 590-596, 2011.

RIPOLL, J.; URBAN, L.; STAUDT, M.; LOPEZ-LAURI, F.; BIDEL, L. P. R.; BERTIN, N. Water shortage and quality of fleshy fruits, making the most of the unavoidable. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 65, n. 15, p. 4097-4117, 2014.

ROCCO, C. D.; MORABITO, R. Production and logistics planning in the tomato processing industry: A conceptual scheme and mathematical model. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 127, n. 7, p. 763-774, 2016.

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura do arroz e irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 12-16, 2002.

SENA, C. C.; ALVES JÚNIOR, J.; DOMINGOS, M. V. H.; ANTUNES JUNIOR, E. J.; BATTISTI, R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 17228-17240, 2020.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: 23 ACM national conference, New York. **Proceedings**, New York, Association for Computing Machinery, p. 517-524, 1968.

SILVA JUNIOR, A. R.; RIBEIRO, W. M.; NASCIMENTO A. D. R.; SOUZA C. B. Cultivo do tomate industrial no Estado de Goiás: evolução das áreas de plantio e produção. **Conjuntura Econômica Goiana**, Goiânia, n. 34, p. 97-109, 2015.

SILVA JUNIOR, J. F.; SILVA, A. O.; KLAR, A. E.; SILVA, I. P. F.; TANAKA, A. A. Produção e desenvolvimento da cultura do tomate submetida a diferentes estratégias de irrigação e qualidade da água. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 2, p. 298-313, 2018.

THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; VALDEZ, L. C.; FERNANDEZ, M. D. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 88, n. 1-3, p. 147-158, 2007.

TUNÇAY, T.; BAYRAMİN, I.; ATALAY, F.; ÜNVER, I. Assessment of Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation on Spatial Variability of Selected Soil Properties in the Cukurova Plain. **Journal of Agricultural Sciences**, Ankara, v. 22, p. 377-384, 2016.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Bucarest, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VIOL, M. A.; CARVALHO, J. A.; LIMA, E. M. C.; REZENDE, F. C.; MATTOS, R. W. P.; RODRIGUES, J. L. M. Déficit hídrico e produção do tomate cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 1, p. 1244-1253, 2017.

VURUKONDA, S. S. K. P.; VARDHARAJULA, S.; SHRIVASTAVA, M.; SKZ, A. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. **Microbiological Research**, Jena, v. 184, n. 3, p. 13-24, 2016.

WORLD PROCESSING TOMATO COUNCIL - WPTC. **World production estimate of tomatoes for processing (in 1000 metric tonnes)**. Banco de dados. Disponível em: <<http://www.wptc.to/pdf/releases/WPTC%20World%20Production%20estimate%20as%20of%2027%20October%202016.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

ZHENG, J.; HUANG, G.; JIA, D.; WANG, J.; MOTA, M.; PEREIRA, L. S.; HUANG, Q.; XU XUAB; HAIJUN LI H. Responses of drip irrigated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Yield, quality and water productivity to various soil matric potential thresholds in an arid region of Northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 129, n. 14, p. 181-193, 2013.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso dos algoritmos SAFER e METRIC mostraram ser capazes de estimar a evapotranspiração atual pixel a pixel da cultura do tomate para processamento industrial irrigado por pivô central. Esses modelos têm a vantagem de serem aplicados sobre imagens de satélite obtidas gratuitamente, além de necessitarem relativamente de poucos dados de entrada para fornecerem a evapotranspiração em larga escala.

Entretanto, por possuir variações constantes ao longo do tempo o mapeamento da evapotranspiração para o uso no manejo da irrigação deve possuir uma periodicidade. O uso de imagens do Landsat 8, que tem resolução temporal de 16 dias, juntamente com a inutilização de imagens com presença de nuvens podem limitar o número de imagens amostradas durante o ciclo do tomateiro industrial influenciando no monitoramento do mesmo. Para contornar essas restrições sugere-se estudos que analisem o uso em conjunto de imagens obtidas de outros satélites orbitais e/ou de câmeras acopladas em drones. E se possível essas imagens terem frequências temporais diferentes e que possuem sensores termais que deixam a estimativa da evapotranspiração mais precisa.

A boa correlação da evapotranspiração estimada pelos algoritmos no período de maior necessidade hídrica da cultura sugere confiabilidade dos resultados e aplicação no manejo da irrigação. Mas a avaliação da evapotranspiração estimada por estes modelos, SAFER e METRIC, e outros modelos comparando-os com a evapotranspiração determinada em campo (lisimetria, por exemplo), em diferentes situações de produção, em regiões diferentes e sistemas de irrigações diferentes corroboraria com a consolidação do uso de algoritmos na agricultura irrigada.

O alto estímulo à adubação é uma característica da tomaticultura goiana, e uma das principais consequências da irrigação em excesso é o favorecimento da lixiviação de nutrientes. Desta combinação, surge o pressuposto que a irrigação errônea pode estar desviando a produtividade do tomate para processamento industrial. Portanto, avaliar a correlação desses fatores colaboraria para advertir o produtor de possíveis falhas na produção.

Neste sentido, ao diagnosticar o uso da água na irrigação do tomate para processamento industrial, observou-se que a inexistência de um responsável técnico exclusivo para o manejo da irrigação, com contato direto e treinamento adequado foi uma das principais dificuldades encontradas durante o período de análise. Esse fato expõe que o manejo da irrigação não é visto como imprescindível no êxito da produção. E esse desmerecimento refletiu nos resultados apresentados. Que deveras a irrigação praticada pelos produtores de tomate para processamento industrial é realizado empiricamente e muitas vezes de forma errônea.

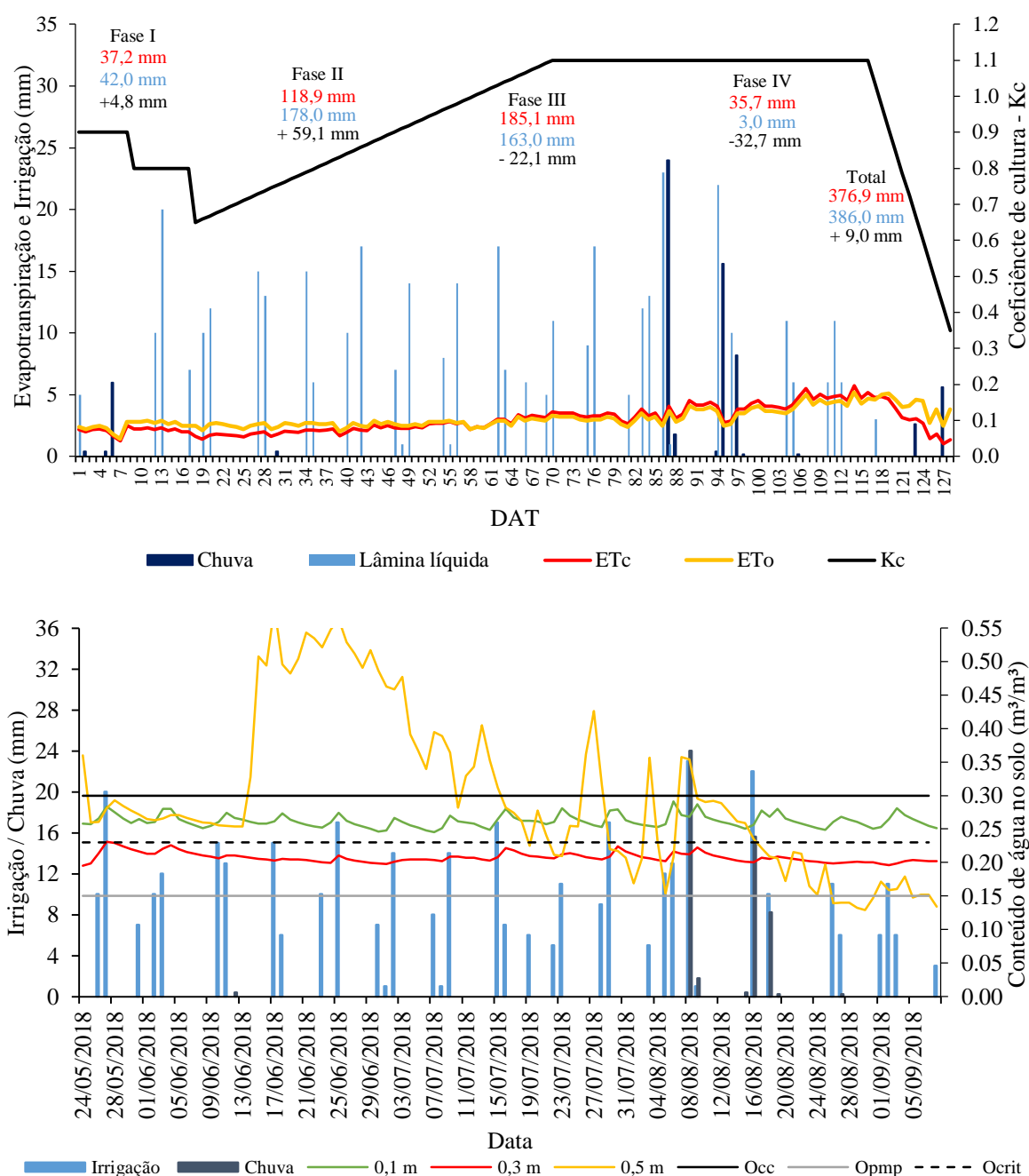
Deste modo, pesquisas voltadas para o manejo da irrigação na tomaticultura industrial, ainda devem ser realizadas, a fim de propor melhorias, métodos e ferramentas, como visto neste trabalho, que permitam uma cadeia produtiva rentável, eficiente e sustentável.

ANEXOS

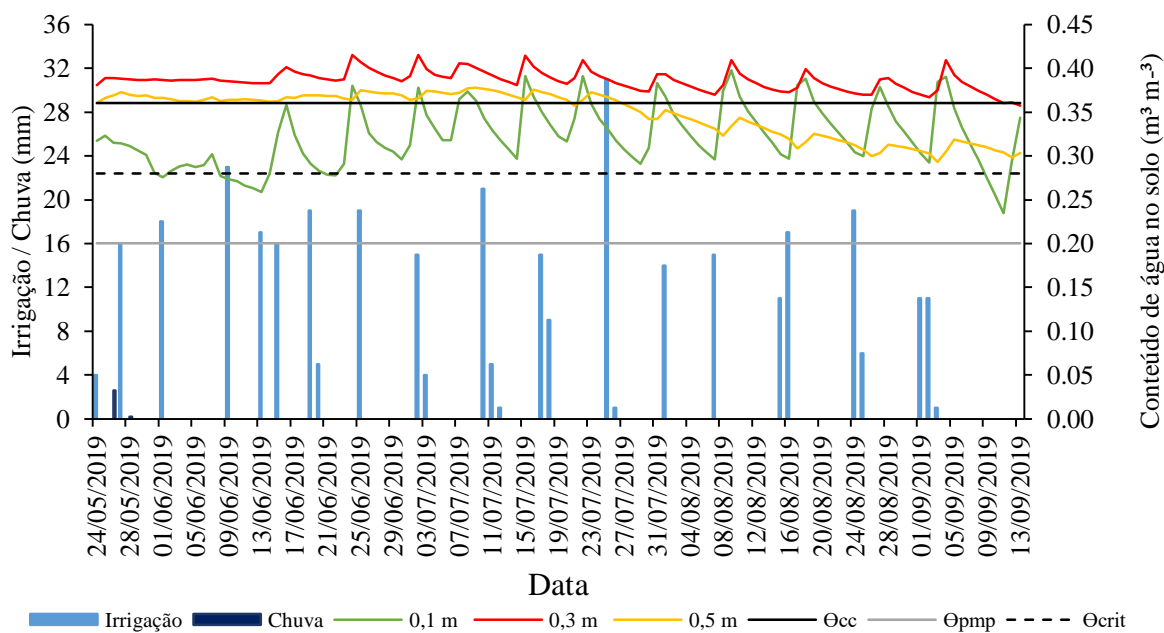
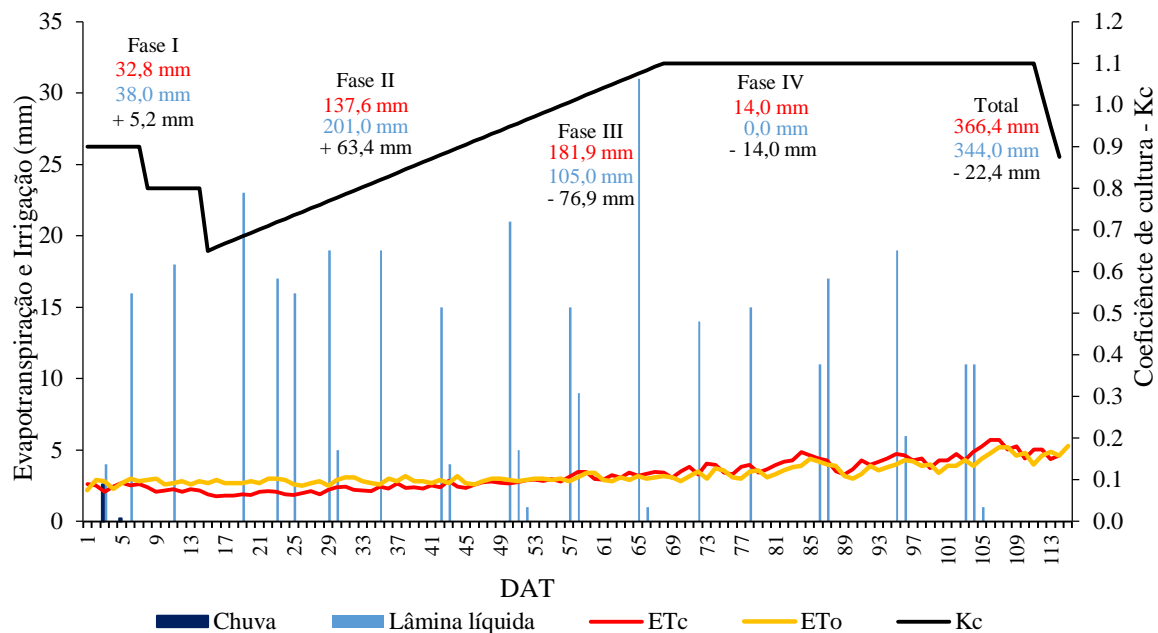
ANEXO 1

Dados da evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c), lâminas líquidas de irrigação, precipitações pluviométricas e conteúdo de água no solo (0,1; 0,3 e 0,5 m) na produção de tomate para processamento industrial em áreas irrigadas por pivô central.

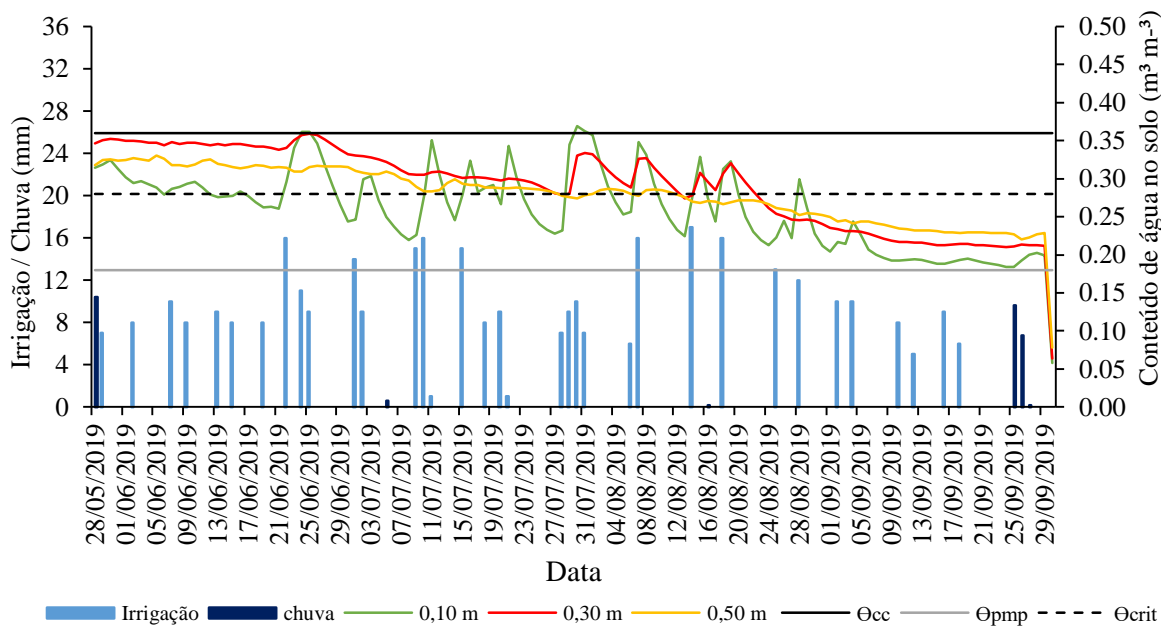
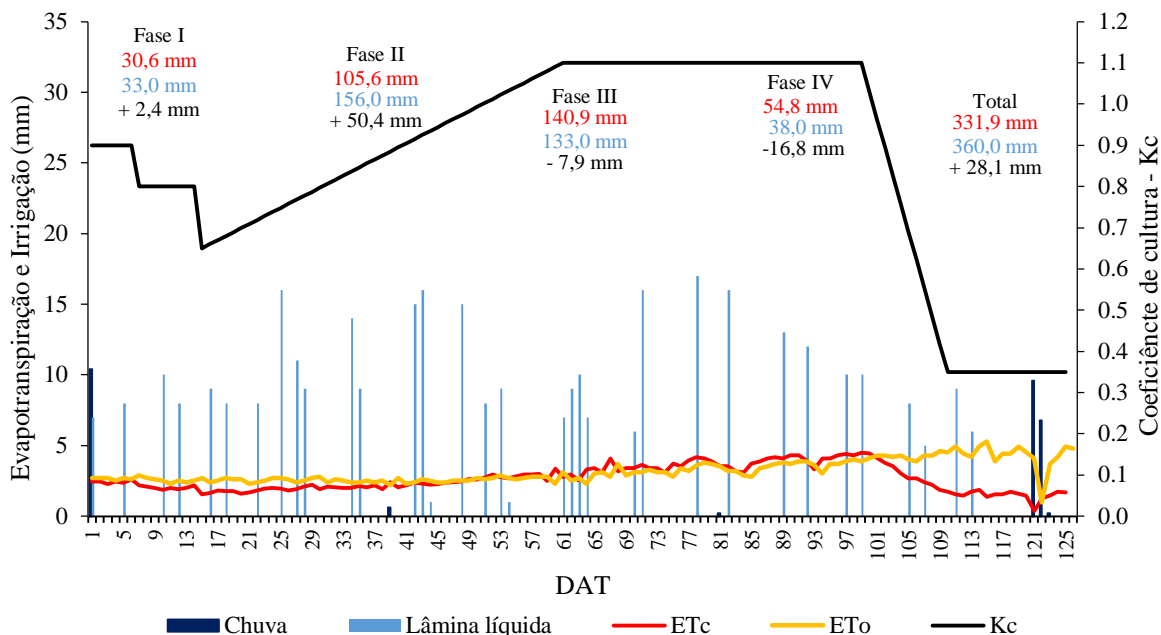
2.1 Área A1-18 (Anápolis – GO - 2018)



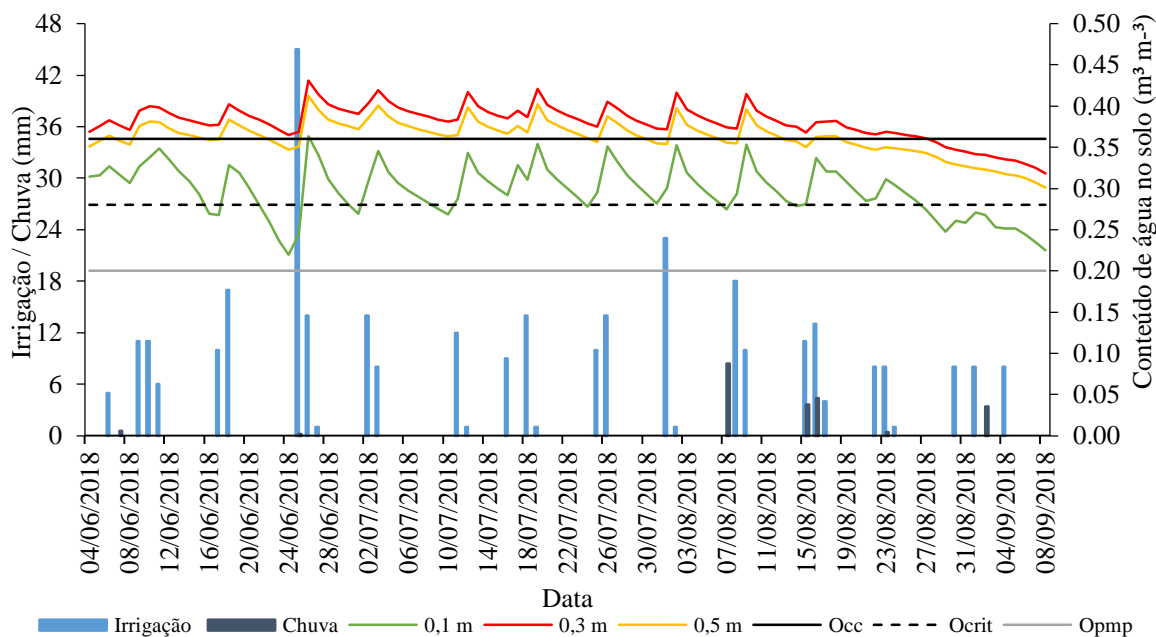
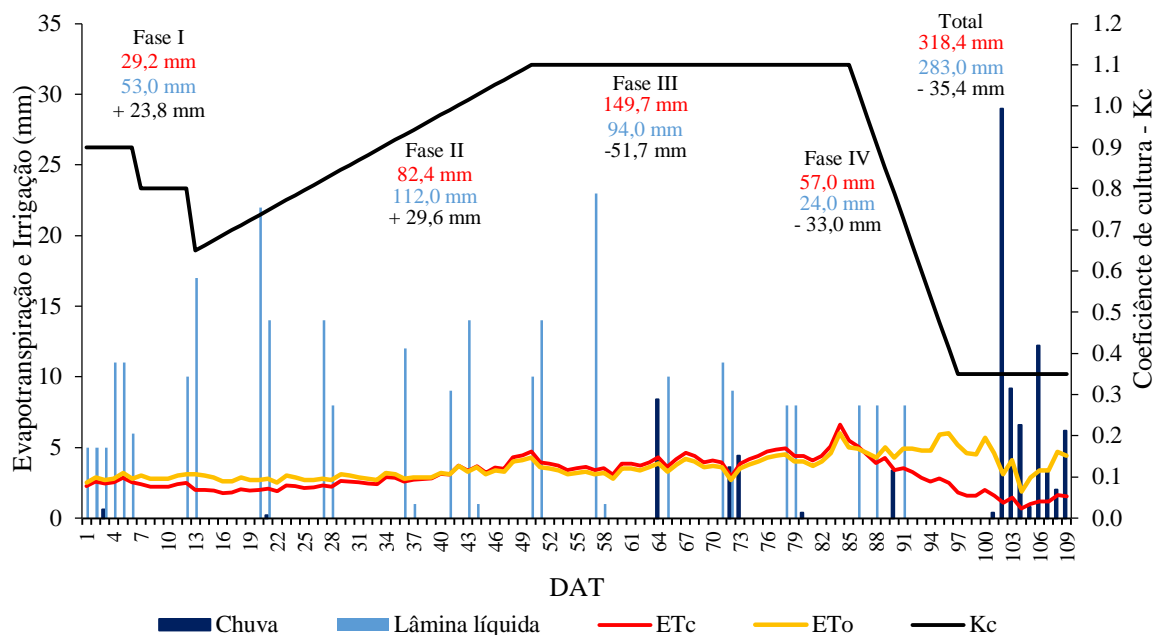
2.2 Área A2-19 (Gameleira de Goiás – GO - 2019)



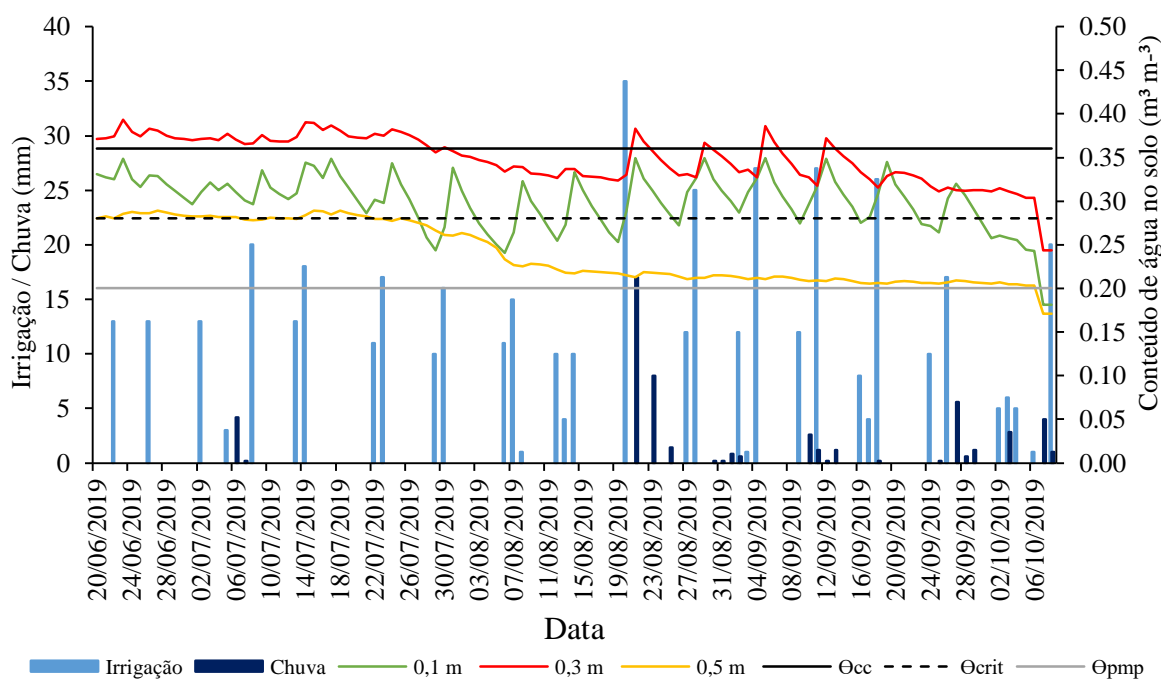
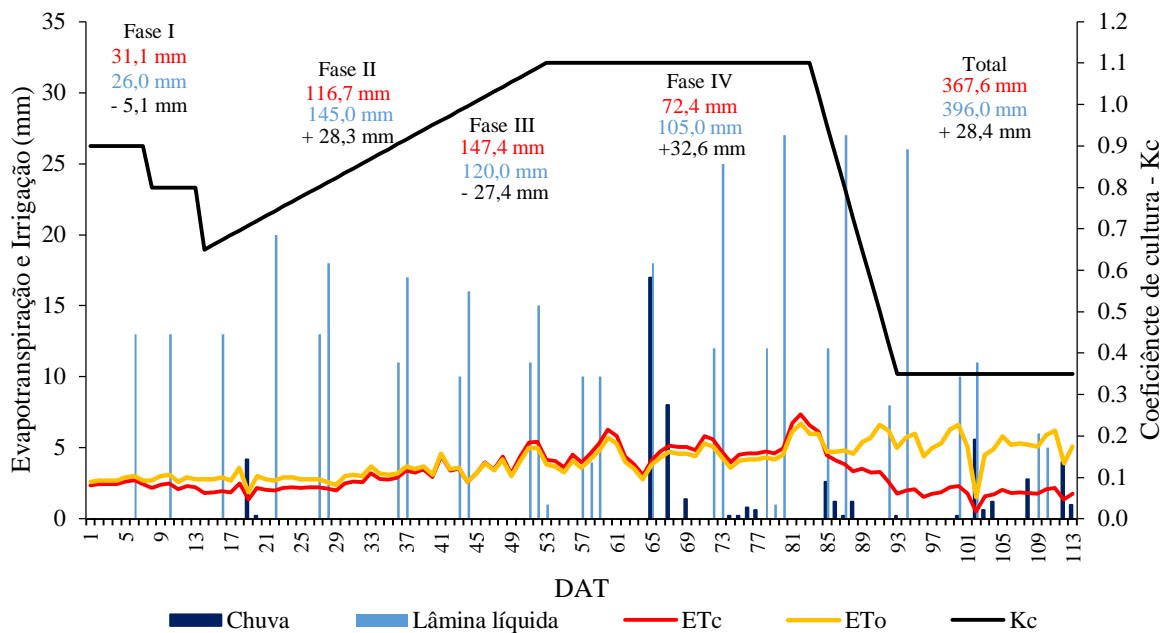
2.3 Área A3-19 (Hidrolândia – GO - 2019)



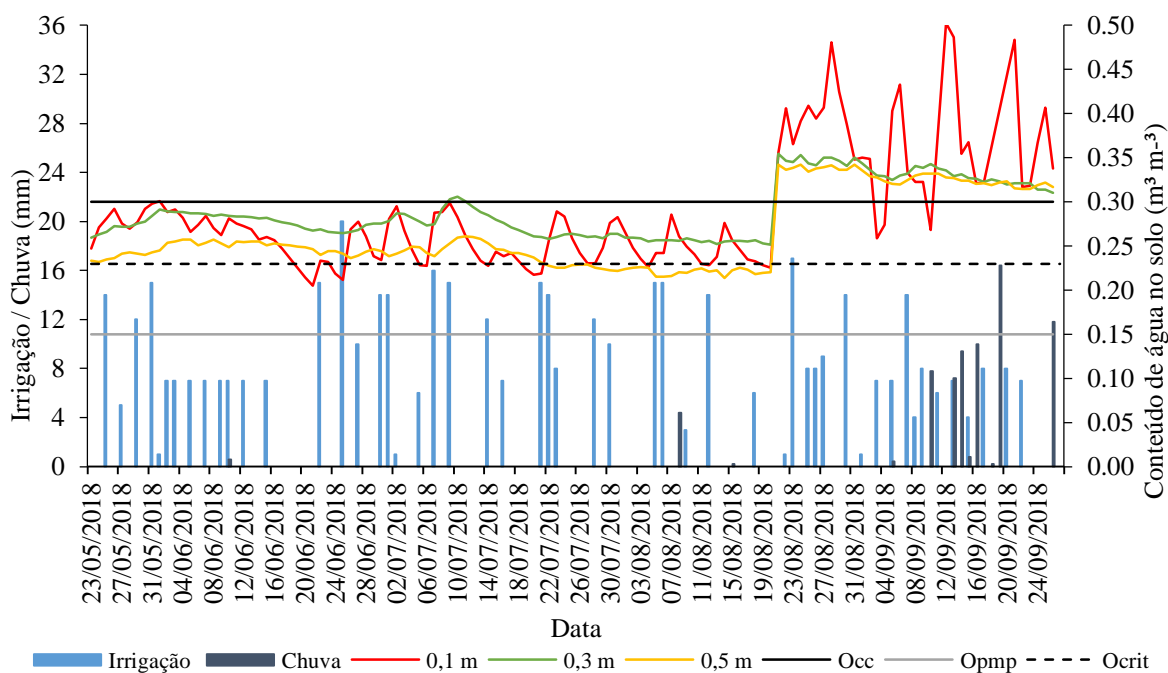
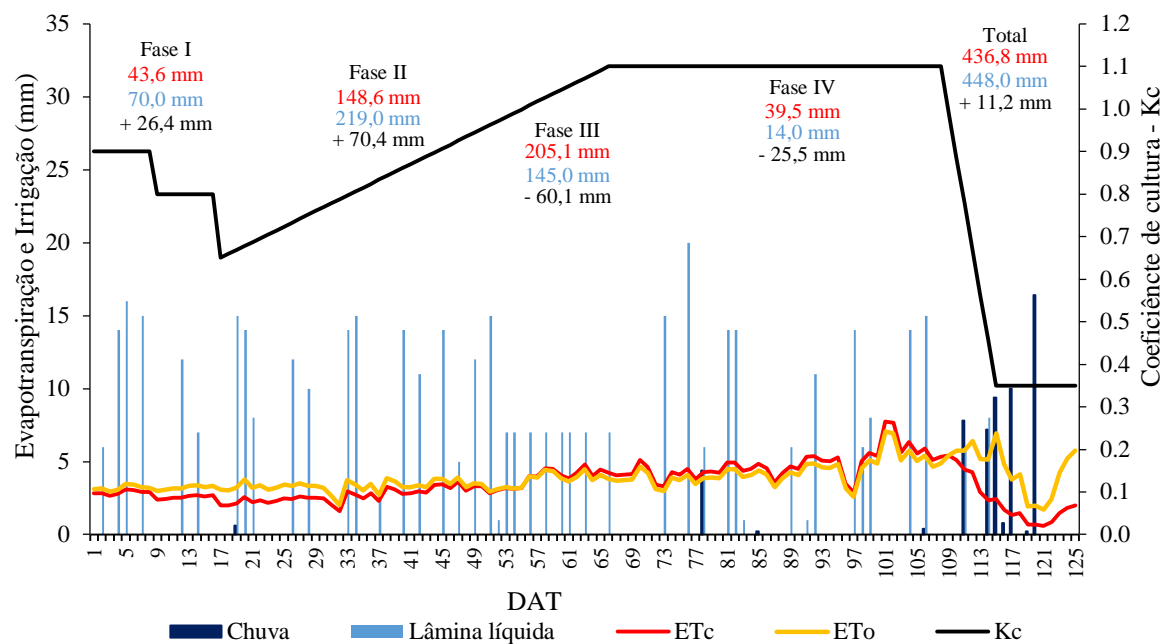
2.4 Área A4-18 (Palmeiras de Goiás – GO - 2018)



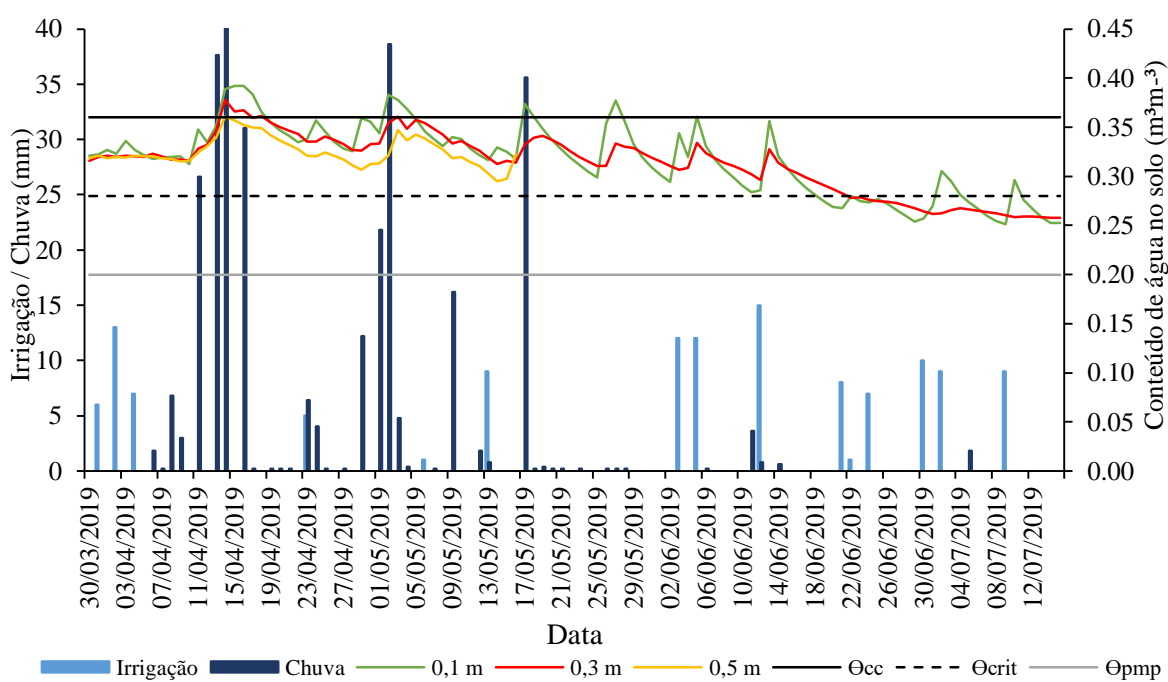
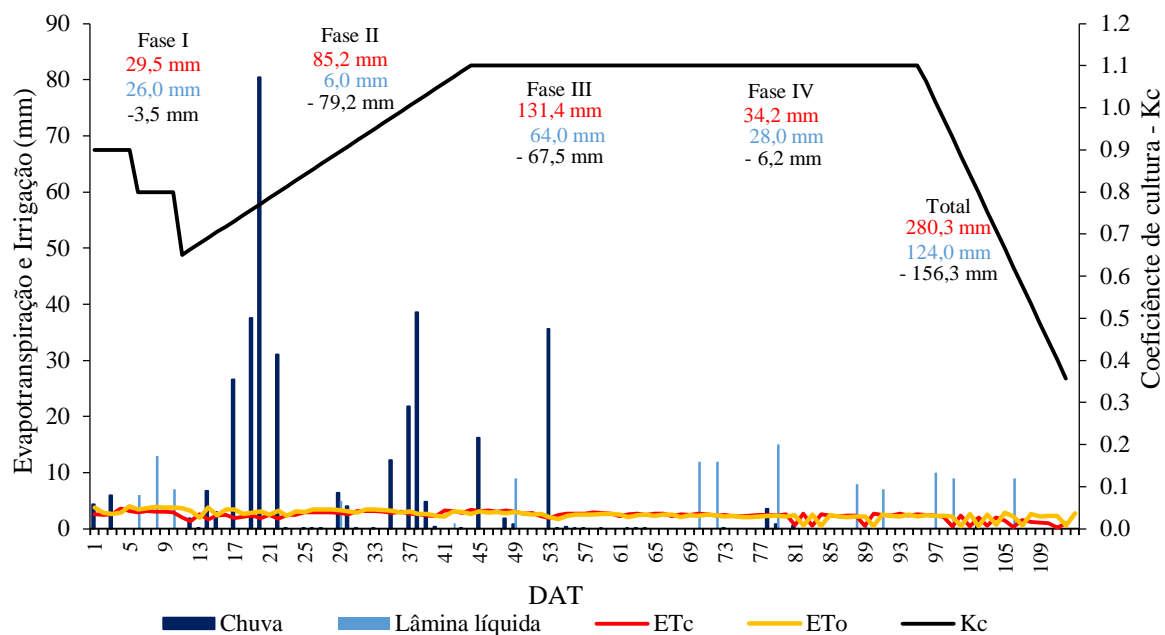
2.5 Área A4-19 (Palmeiras de Goiás – GO - 2019)



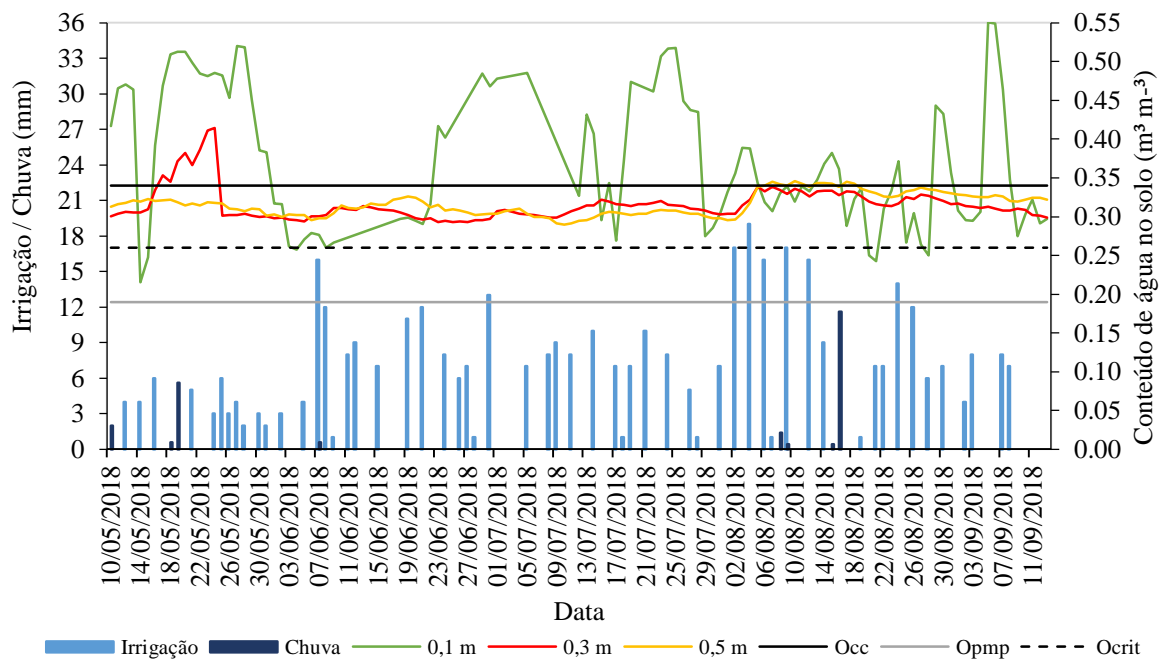
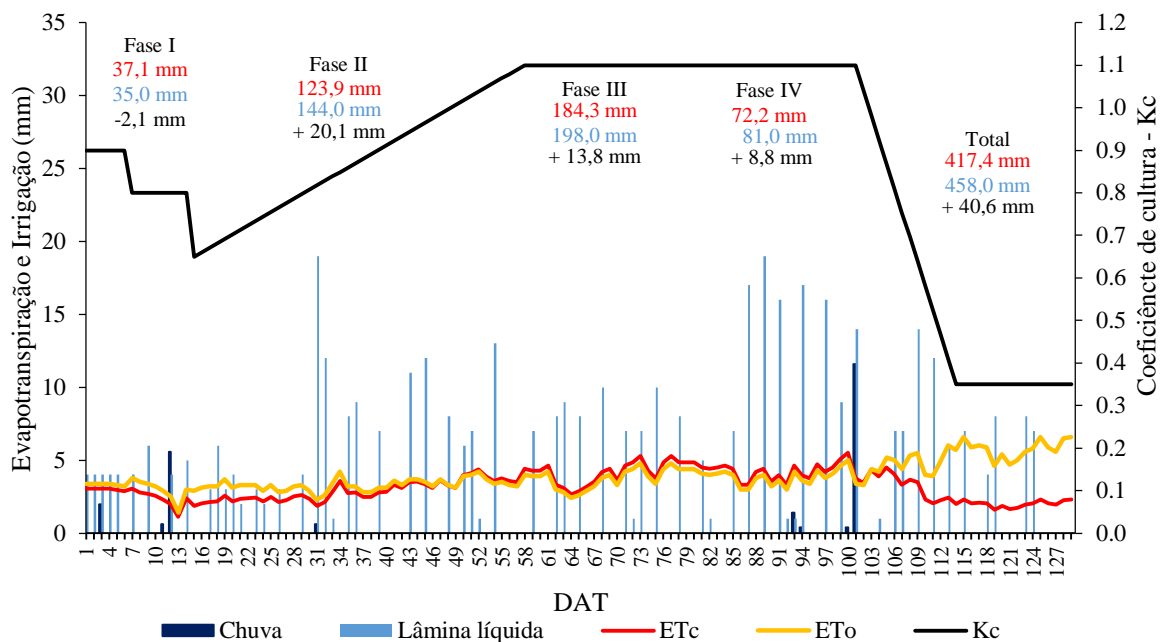
2.6 Área A5-18 (Piracanjuba – GO - 2018)



2.7 Área A5-19 (Piracanjuba – GO - 2019)



2.8 Área A6-18 (Silvânia – GO - 2018)



2.9 Área A6-19 (Silvânia – GO - 2019)

