

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ANÁPOLIS – UniEVANGÉLICA  
CURSO DE AGRONOMIA**

**ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DO  
ALGORITMO METRIC**

**Luigui Nylcheli Borges Holanda**

**ANÁPOLIS-GO  
2020**

**LUIGUI NYLCHELI BORGES HOLANDA**

**ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DO  
ALGORITMO METRIC**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário de Anápolis- UniEVANGÉLICA, para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

**Área de concentração:** Sensoriamento remoto  
**Orientador:** Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza.

**ANÁPOLIS-GO  
2020**

Holanda, Luigui Nylcheli Borges.

Estimativa de evapotranspiração a partir do algoritmo METRIC/ Luigui Nylcheli Borges Holanda – Anápolis: Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, 2020. 43 páginas.

Orientador: Prof. Dr. João Maurício Fernandes Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Agronomia – Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, 2020.

1. Balanço Hídrico 2. Irrigação 3. Uso da água I. Luigui Nylcheli Borges Holanda. II. Estimativa de evapotranspiração a partir do algoritmo METRIC.

CDU 504

**LUIGUI NYLCHELI BORGES HOLANDA**


**ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DO ALGORITMO  
METRIC**

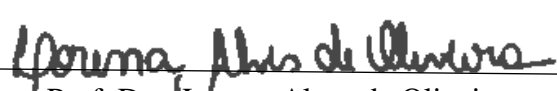
Monografia apresentada ao Centro  
Universitário de Anápolis –  
UniEVANGÉLICA, para obtenção do título de  
Bacharel em Agronomia.


**Área de concentração:** Sensoriamento remoto

Aprovada em: 14 / 12 / 2020

Banca examinadora

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza  
UniEvangélica  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Lorena Alves de Oliveira  
UniEvangélica

  
\_\_\_\_\_  
Me. Carolina Carvalho Rocha Sena  
Membro externo

Dedico esse trabalho a minha família.

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por me guiar até o final desta jornada, pois sei que por mais difícil que seja ele sempre esteve e estará aqui para me levantar e me guiar.

Quero agradecer a minha família especialmente aos meus pais José Holanda Cavalcante Sobrinho e Jandira Jose Borges por terem me proporcionado a realizar mais esta jornada mesmo tendo tanto ciúme de mim me permitiram mudar de cidade para estudar e sempre me apoiaram em todas as decisões.

Agradeço especialmente a minha namorada Wanessa Teixeira Machado que mesmo com tantos surtos que já tive com a faculdade ela sempre esteve do meu lado, seja nos piores e nos melhores momentos, trazendo alegria, amor e as vezes um pãozinho com ovo para eu lanchar antes de dormir. Agradeço também a toda sua família que sempre me acolheu de braços abertos.

Agradeço as minhas irmãs Laísila Nylcheli Borges Holanda e seu namorado Jonathan Menegatte, Larissa Nylchele Borges de Holanda e seu marido Elismar Pereira da Silva que todas as vezes que eu estava para baixo elas sabiam me animar novamente.

Agradeço também aos meus sobrinhos, Emanuel de Holanda Pereira e Anthony de Holanda Pereira e Geovanna de Holanda Pereira que mesmo eu estando ausente a maior parte da sua infância todas as vezes que eu os via me recebia com um grande e gratificante sorriso.

Agradeço a todos os meus parentes em especial aos meus avós paternos que com tanto carinho me receberam em sua casa logo quando me mudei para Anápolis e mesmo com a diferença em seus jeitos de viver mudaram bastante seus jeitos para que eu me sentisse a vontade, me acolhendo nesses primeiros anos que eu cheguei a Anápolis.

Agradeço a todos meus colegas que me aguentaram por todos esses anos em especial a Andressa Sampaio Chaves, Lettycia Moreira Lima, Rafaela Juliana Giglioti, meu parceiro Felipe Augusto Balbino vulgo Fefe, Tiphani Rocha de Araújo, João Pedro de Souza Cunha Caetano, Mikaelle Conceição da Silva, Barbara de Carvalho Moreira, Gabriel Neri, Matheus Vinicius Moreira, Vinicius Guilherme Soares Nunes, Adriano Lima Jung, Sergio Moura Guimarães, Henrique Lopes Carvalho, agradeço a meu melhor amigo! Meu cachorro Nick que sempre esteve comigo para tudo que precisei me fazendo sorrir nos piores momentos aguentando todos os trancos e barrancos junto comigo sem reclamar nenhuma vez e a todos os outros que eu tinha mais afinidades, mas que por serem muitos não cabe nos agradecimentos.

Agradeço aos meus amigos de serviço Aline Oliveira, Deborah Almeida, Nayz Cassia, Amanda Abreu, Keliany Marçal, Adriane, Rafael Silva, Gabriel Tiburcio entre outros que passam um bom tempo durante o dia comigo aguentando as minhas besteiras.

Agradeço a todos os professores da UniEVANGÉLICA que colaboraram com todo o meu aprendizado, em especial ao meu orientador Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza, e aos excelentes professores Cláudia Rezende, Klênia Pacheco, Josana Peixoto, Yanuzi Mara, Clistiane Anjos, Alan Carlos, Lucas Marquezan, Marcos Francisco, João Daros, Elson de Jesus e todos os outros que também por serem muitos não couberam aqui.

“Cuide, cultive, queira o bem. O resto vem!”  
Caio Fernando Abreu



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>11</b>
2.1. EVAPORAÇÃO .....	11
2.2. TRANSPIRAÇÃO.....	11
2.3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	12
2.4. USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA.....	12
2.5. SENSORIAMENTO REMOTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS .....	13
<b>2.5.1. Sensoriamento remoto e agricultura.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5.2. Sistemas de informação geográfica – SIGs aplicados na agricultura .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.3. Modelos de estimativa de evapotranspiração.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5.4. Mapping evapotranspiration with internalized calibration - METRIC.....</b>	<b>15</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	17
3.2. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO METRIC .....	17
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>40</b>

## RESUMO

O uso da água na agricultura deve ser bem manejada para que se obtenham melhores resultados no desenvolvimento da cultura resultando em uma boa produtividade, á vista disso, tem surgido ferramentas de sensoriamento remoto que visam auxiliar na determinação da quantidade de água que é perdido pelo processo de evapotranspiração (ET), possibilitando um manejo eficiente da água de irrigação resultando em uma produção de forma sustentável. O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência do algoritmo METRIC (Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration) na estimativa da evapotranspiração da cultura do milho em comparação ao método padrão FAO-56 e os Kcs utilizados pelo produtor em campo. O estudo foi realizado no município de Cristalina-GO entre os meses de março de 2019 e maio de 2019. Para a aplicação do algoritmo METRIC foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 8 (OLI/TIRS) adquiridas gratuitamente no USGS (United States Geological Survey). Para a obtenção da  $ET_0$ , foi utilizado o método de Penman-Monteith utilizando dados de uma estação meteorológica próximo ao local de estudo. Para a obtenção da evapotranspiração da cultura (ET) em campo foi utilizado método padrão FAO-56. As estimativas de evapotranspiração atual (ETa), foram correlacionadas a ET de forma a avaliar o desempenho do algoritmo. Os resultados obtidos foram significativos apresentando valores de ETa similares aos obtidos a partir dos kc's utilizados pelo produtor. Os Kc's obtido pelo algoritmo METRIC variou entre 0,79 e 1,15 enquanto os obtidos em campo pelo produtor variaram de 0,50 a 0,97; o erro absoluto entre ETa obtidas pelo produtor e a ETa obtidas pelo algoritmo METRIC variaram entre 0,05 e 1,01 mm.dia<sup>-1</sup>, apresentando significante correspondência entre o ETa FAO e o ETa METRIC (correlação de Person,  $r = 0,73$ ; Índice de Willmott,  $d = 0,62$ ; índice de confiança,  $c = 0,45$ , sendo classificado como “mau”), dessa forma o algoritmo METRIC pode ser usado para a estimativa atual do milho.

**Palavras-chave:** Balanço hídrico, sensoriamento remoto, uso da água na agricultura.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é o recurso que apresenta maior importância em todos os aspectos da vida, porém sua presença ou ausência pode causar muito prejuízo no homem e no ambiente, onde quando este aparece em excesso causam inundações e calamidades ambientais, e sua escassez irá provocar fome no mundo. Quando usado de forma adequada, a água pode levar a excelentes resultados na produção de alimento, o oposto acarretará na degeneração no meio físico natural (PAZ et al., 2000). Segundo Faggion et al. (2009) a água é de extrema importância para a produção de alimentos de origem vegetal e animal, podendo em sua falta impossibilitarem as produções agrícolas e pecuarista, desse modo foi desenvolvido medidas para o correto uso da água para a conservação dos recursos hídricos, tais como, o uso de equipamentos que apresentam uma maior eficiência referente às características edafoclimáticas e aos cultivos locais, a quantidade hídrica disponibilizada aos cultivares naquele local, o manuseio adequado da água nos sistemas de irrigações para reduzir as perdas por evaporação, escoamento superficial ou percolação profunda, além destas medidas deve-se adotar métodos agrícolas economicamente, socialmente e ambientalmente sustentáveis, como a conservação dos recursos edafoclimáticos (água e solo), métodos de plantio sustentáveis, manejo da cultura agronomicamente adequada, adoção de métodos pós-colheita eficientes e comercializações.

A compatibilização entre a disponibilidade e a demanda hídrica somente poderá ser feita quando devidamente examinados os parâmetros climáticos, especialmente a precipitação, evaporação, evapotranspiração e hidrológicos, como a movimentação e a mensuração das águas superficiais e subterrâneas no espaço e no tempo (MEDEIROS et al., 2013). De acordo com Cruz (2017), o processo sincrônico da evaporação presente na superfície do solo e das vegetações juntamente com a água transpirada pelos tecidos vegetais se denomina evapotranspiração (ET). Ao avaliar adequadamente a ET essencial para identificar a necessidade hídrica das culturas pode-se ter uma base para o eficiente manejo de irrigação. Almeida et al. (2010), afirmam que a determinação da água perdida pela ação conjunta da evaporação da superfície do solo e a transpiração dos vegetais denominada de evapotranspiração é um dos princípios para o sucesso da produção agrícola.

Segundo Pereira (2004); Allen et al. (2011) citado por Ramalho (2019), para se verificar a necessidade de água que uma cultura necessita deve se estar informado da taxa de evapotranspiração (ETc) da cultura, para definição desta existe diversas maneiras de

quantificar, sendo algumas delas o uso do lisímetros, o método de flutuações instantâneas (eddycovariance), ou pode ser feitos por cálculos através dos dados micrometeorológicos ou com base nas variações agrometeorológicas.

Segundo Pereira (2019), o uso de sensores remotos para obtenção de dados, possibilita a captura de imagens sem o contato direto com o objeto de estudo, obtendo assim informações de elementos em análise sem necessariamente estar presente no local. Esta técnica manifestou-se no século XVIII, porém foi na época da Segunda Guerra Mundial com a fabricação e disponibilização de sensores na órbita da Terra que esta técnica ganhou forças.

O uso do sensoriamento remoto na agricultura tem sido estudado desde o ano de 1970, a fim de avaliar a quantidade de área plantada e definir qual será a sua produtividade. O primeiro país a usar o sensoriamento remoto na agricultura foi o Estados Unidos da América a qual teve como objetivo do seu primeiro projeto, a potencialidade e viabilidade de se usar imagens de sensores Multispectral Scanner System (MSS) do satélite Landsat-1, para a estimativa da área de trigo cultivada no mundo, juntamente com essa análise foram usados modelos meteorológicos para estimativa de rendimento por área plantada, onde mais a frente o Departamento de Agricultura Norte-Americana (Usda), Large Area Crop Inventory Experiment (Lancie), National Oceanic and Atmospheric Administration (Noaa), daria continuidade a este trabalho, porém desta vez não apenas ao trigo, mas também para outros cereais de interesse global (FORMAGGIO; SANCHES, 2017).

O Mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) foi desenvolvido na Universidade de Idaho (TREZZA et al., 2013), sendo usado para a maximização da resolução da evapotranspiração, a partir das imagens obtidas pelo satélite Landsat, podendo ainda utilizar imagens MODIS. O METRIC usa como base o SEBAL algoritmo pioneiro na obtenção do balanço de energia (BASTIAANSEN, 1995). Segundo afirmado por Allen et al. (2007) não há diferença no METRIC usando os algoritmos do Landsat ou do MODIS, contudo, os resultados irão diferir como por exemplo na obtenção dos índices de vegetação, da refletância da superfície e o albedo, isso tudo devido as bandas de ondas curtas disponíveis no MODIS serem diferentes das bandas disponíveis na Landsat.

O objetivo com este trabalho foi avaliar a viabilidade do algoritmo METRIC na obtenção da evapotranspiração do milho em comparação com o método padrão FAO-56.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. EVAPORAÇÃO**

Segundo Lima (2019), a evaporação é o processo de transferência de água na forma de vapor para a atmosfera, devido dois processos, sendo um deles a evaporação o qual se encontra frequentemente em superfícies hídricas naturais ou em solos úmido sem coberturas vegetais, e o outro processo é através das superfícies de gelo, por exemplo, as geleiras e campos de neves.

Na mesma linha de raciocínio Pereira et al. (2019), afirma que existem diversos fatores que influenciam em forma negativa e positiva na evaporação da água, como a concentração da substância evaporante e a de outras substâncias do ar, umidade relativa do ar, vazão do ar, temperatura, força intermoleculares, pressão barométrica, entre outros elementos significativos como por exemplo a velocidade do vento, temperatura do ar, frequência da radiação do ar e a umidade relativa do ar e do solo. As perdas por evaporação irão influenciar diretamente na quantidade de água disponíveis onde poderá se ter uma garantia da demanda de água restante para o uso, um dos critérios essenciais para o gerenciamento dos recursos hídricos (COELHO, 2016).

### **2.2. TRANSPIRAÇÃO**

Existem diversos fatores que podem influenciar na transpiração da água, tais como o clima, a idade da planta, o solo e a disponibilidade de água presente nele, sobretudo as espécies florestais que se encontram naquela região. Além de todos estes fatores a diminuição da umidade relativa do ar e o aumento das temperaturas podem intensificar diretamente a transpiração, mesmo em situações em que o ar se encontra saturado decorrente do aumento na diferença de pressão de vapor entre o ar e a folha, causado pela forte incidência da radiação solar (SOUZA et al., 2011).

Silva et al. (2013) e Barboza; Teixeira Filho (2017) verificaram ainda que a transpiração decresce em função das limitações hídricas. Segundo Franco (2008) a variação da massa corresponde à perda de água por transpiração pelas folhas, nos primeiros minutos, após a remoção da folha da planta não havia muita alteração na taxa de transpiração. Existem

espécies que não demonstram esta diminuição na transpiração e outras que apresentam valores de perdas por transpiração considerável em períodos de seca.

### 2.3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Afirma Armani et al. (2018), que a evapotranspiração se refere a somatória da perda de água para a atmosfera por meio da transpiração dos organismos e da evaporação da lâmina d'água superficial, sendo assim a evapotranspiração e classificado como um processo natural. Na literatura se encontra diversos tipos de evapotranspiração, sendo elas a evapotranspiração real/atual aquela em que a planta está realizando naquele momento, a evapotranspiração de referência que é a evapotranspiração total realizada por uma área cultivada com cultivos baixos, com desenvolvimento ativo e sem nenhuma interferência no seu desenvolvimento não podendo faltar nesse momento a presença dos recursos hídricos e a evapotranspiração da cultura que refere a quantidade de água que uma cultura específica perde através da evapotranspiração (FERNANDES et al., 2010). Na mesma linha de raciocínio Denski (2015) afirma que a evapotranspiração ocorre através da evaporação e transpiração agindo em conjunto no sistema solo-planta, e afirma que a evapotranspiração é o oposto da precipitação, e os dois juntos formam o balanço hídrico da superfície.

O cálculo da evapotranspiração tem muita importância, pois ela determina o balanço hídrico de uma área, facilitando a aplicação do manejo adequado sendo possível aprimorar o uso de água. As taxas de evapotranspiração são reduzidas conforme se reduz a ocorrência de radiações, isso devido à massa de ar que forma uma barreira impedindo que a radiação ultrapasse-a, além disto, é sabido que nestas situações há uma queda na temperatura (FREITAS et al., 2018).

### 2.4. USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA

A compatibilização entre a disponibilidade e a demanda hídrica somente poderá ser feita quando devidamente examinados os parâmetros climáticos, especialmente a precipitação, evaporação e evapotranspiração, e hidrológicos, como a movimentação e a mensuração das águas superficiais, subterrâneas no espaço e no tempo (MEDEIROS et al., 2013). Segundo Santana; Freitas (2012), a água disponível em nosso planeta tem como maior ameaça as ações indevidas do homem, tais como o desperdício da água.

Em dados apresentados por Christofidis (2013), e afirmado que em 2010 seria necessário um volume anual de 4.420 km<sup>3</sup> de água para atender ao uso doméstico, industrial e agrícola, na qual o uso doméstico necessitaria de aproximadamente 10% do volume de água consumível presente na superfície terrestre, em seguida se destaca as produções industriais com aproximadamente 20% do volume, e por fim o uso na produção agrícola, a qual tem a maior porcentagem do uso da água com aproximadamente 70% do volume.

A agricultura irrigada tem atraído muitos agricultores no mundo devido suas vantagens como, por exemplo, a independências de recursos climáticos, facilidades nas aplicações de defensivos e fertilizantes, além de melhor resultado na produção final, segundo Christofidis (2013), a produtividade em áreas irrigadas tem resultado em uma produtividade 2,7 maior do que em áreas de agricultura tradicional (sequeiro), possibilitando um melhor manejo de produção e disponibilidade de água tanto em quantidade quanto em qualidade e oportunidades, fazendo com que o mercado agrícola e pecuário tenha um desempenho em sua produção.

O uso da água pode trazer a agricultura alguns problemas quando relacionado ao seu mau uso, Deus; Bakonyi (2012) aponta que o uso inadequado da água em conjunto com o uso intensivo do solo potencializa o processo natural de erosão e assoreamento dos cursos de água, outro fator que pode ser causado pelo uso incorreto da água segundo Rabello (2009) é o encharcamento e salinização dos solos. Segundo Brum et al., (2019) a racionalização no uso de água vem crescendo cada vez mais devido as secas e as longas estiagem que eram visto no mundo, mas que recentemente tem aparecido em regiões onde não havia incidência.

## 2.5. SENSORIAMENTO REMOTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

### 2.5.1. Sensoriamento remoto e agricultura

O sensoriamento remoto refere-se à obtenção de dados e informações sem a necessidade de um contato físico entre o objeto e o sensor, isto devido a radiação eletromagnética e o alvo terrestre em análise (ALBA, 2014). Segundo Ongaratto (2019) o sensoriamento remoto pode ser entendido como a obtenção de dados usando uma série de sensores e equipamentos de transmissão que são inseridos em plataformas espaciais e/ou aeronaves com o propósito de estudar as ocorrências na superfície terrestre por meio da relação entre as radiações eletromagnética e as substâncias que compõem.

Fitz (2018), afirma que para a obtenção dos dados de sensores, é necessário que haja uma fonte/energia radiante, um objeto visado (alvo na superfície) além de um sistema de imagem luminosa e seu detector denominado sensor. Tschiedel; Ferreira (2002) informa que a agricultura de precisão depende significativamente de tecnologias atuais para o manejo dos solos, insumos e das culturas a fim de adaptá-las para as variações espaciais e/ou temporais que podem afetar a produção final. Três novas tecnologias têm guiado as novas práticas na agricultura sendo elas: o sensoriamento remoto, os sistemas de posicionamento global (GPS) e os sistemas de informação geográficas (SIGs).

O sensoriamento remoto na agricultura pode atuar em diversas áreas podendo, estimar biomassa e produção, levantar informações de áreas plantadas com culturas agrícolas, mapeamentos de áreas afetadas por patógenos e estresse, avaliação de evento climático, pode oferecer informações que auxiliam na compreensão de possíveis efeitos climáticos de mudanças climáticas, identificação de áreas com mudanças bruscas na produtividade e o mapear o desenvolvimento fenológico das culturas entre outros (FORMAGGIO; SANCHES, 2017)

### **2.5.2. Sistemas de informação geográfica – SIGs aplicados na agricultura**

Os sistemas de Informação Geográfica (SIGs) são constituídos por alguns componentes de extrema importância, sendo eles o Hardware (plataforma computacional) Software (programas, módulos e sistema utilizados), dado (registros de informações) e people ware (profissionais e/ou usuário envolvido), além destes componentes os SIGs apresentam várias funções no sistema, conforme o seu uso, sendo algumas delas a aquisição e edição de dados, o gerenciamento do banco de dados, a análise geográfica dos dados e a representação de dados (FITZ, 2018).

O sistema de informação geográfica (SIGs) vem sendo usado para realizar o planejamento hidro-agrícola através de dados, mapas e análise espacial onde são geradas e interpretadas informações precisas que ajudam na classificação climática e no zoneamento agrícola e ambiental, devido a isso o SIG tem extrema importância para realização estudos para áreas onde se existem uma grande variedade de solos, precipitações e vegetações (SANTOS et al., 2013).



### **2.5.3. Modelos de estimativa de evapotranspiração**

Diversos algoritmos têm sido desenvolvidos afim de diversificarem nos métodos para a estimativa da evapotranspiração, conforme afirmado por Lima; Ribeiro (2018) a precisão espacial da estimativa da ET, pode ser afetada conforme o modelo fornecedor de dados escolhido como o SEBAL, SEBS ou o METRIC.

### **2.5.4. Mapping evapotranspiration with internalized calibration - METRIC**

O METRIC foi desenvolvido a partir do modelo SEBAL através do uso da evapotranspiração de referência para determinar condições de balanço de energia em um pixel, sendo muito usada na área da agricultura, estabelecendo uma referência para a estimativa real da evapotranspiração baseados em satélites, além disso, o balanço energético por satélite utilizado pelo METRIC é calibrado internamente em dois casos extremos sendo eles seco e úmidos (ALLEN et al., 2007). O uso do METRIC é voltado à determinação da evapotranspiração através de capturas de imagens geradas por satélites, e mesmo perante as diversas aplicações de balanços de energia por satélite ele possui a vantagem como a sua calibração feita através da referência ET, enquanto as demais são feitas através de frações evaporativas, outra vantagem é através do cálculo do ET ser realizado através do coeficiente de cultivo, onde não é necessário o reconhecimento do cultivo pelo METRIC, como o estágio de desenvolvimento e o tipo da cultura, podendo também ser detectado a evapotranspiração reduzida devido à escassez hídrica no cultivo (ALLEN et al., 2007).

Souza (2016) afirma que tanto como o algoritmo METRIC – Mapping Evapotranspirationa high Resolution with Internalized Calibration, o SEBS – Surface Energy Balance System e o SEBAL Surface Energy Balance Algorithm for Land estimam a evapotranspiração real utilizando o balanço de energia a partir aplicação da equação do balanço de energia. O balanço de energia superficial é usado para capturar imagens de satélites e dados que posteriormente serão usados nos cálculos da evapotranspiração, pelo modelo METRIC. A energia consumida pelo processo de evaporação e a expressão do cálculo de cada pixel da imagem através de uma parte da equação do orçamento de energia da superfície, e assim temos o fluxo da evapotranspiração.

Segundo Oliveira et al. (2014), a definição da evapotranspiração atual (ETa) pelo algoritmo METRIC é por meio de fluxos de calor latente, obtidos por resíduos do balanço de

energia na superfície, o valor do balanço de radiação é obtido através do cálculo entre a diferença da irradiância solar incidente e a radiação infravermelha distante que é emitida ou refletida da superfície da terra por meio dos solos, coberturas vegetativas entre outros. A quantidade de calor que é conduzida ao solo é denominada de fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível, que nada mais é que a troca de calor com o ar por uma relação linear entre resistência aerodinâmica e a diferença de temperaturas entre atmosfera e a superfície terrestre.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no município de Cristalina – GO em uma área de 80 ha situados nas coordenadas (17°13'55" S; 47°26'04" W; 1.237 m). O município de Cristalina, GO apresenta clima subquente, e segundo classificação de Koppen e Geigger o clima é classificado como Cwb, com temperaturas médias de 20,1°C e precipitações médias anuais de 1.422 mm. O município é caracterizado por duas estações bem definidas, sendo elas a seca de inverno e a úmida de verão.

Para estimar a evapotranspiração pelo algoritmo METRIC foram utilizadas imagens do satélite americano Landsat 8 (OLI/TIRS), órbita/ponto 222/71 e 221/72, obtidas gratuitamente no banco de imagens do United States Geological Survey – USG (2020). A evapotranspiração de referência foi estimada a partir do método de Penman-Monteith a partir de dados climáticos obtidos por uma estação agrometeorológica instalada no raio de 1 quilometro da área de estudo. Para estimativa da evapotranspiração de cultura, foi utilizado o método proposto pela FAO, expresso na equação 1 conforme Allen et al. (1998) e os coeficientes de cultivo  $K_c$  utilizados pelo produtor referente as seguintes datas: 08/03/2019 ( $K_c = 0,74$ ), 02/04/2019 ( $K_c = 0,97$ ), 25/04/2019 ( $K_c = 0,97$ ), 11/05/2019 ( $K_c = 0,86$ ) e 20/05/2019 ( $K_c = 0,50$ ).

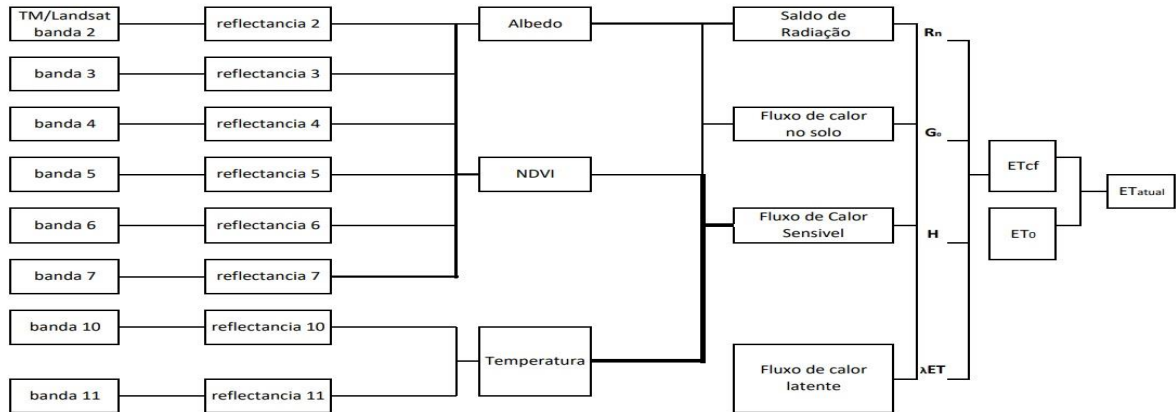
$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

Onde,  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm d}^{-1}$ ), o  $K_c$  refere-se ao coeficiente de cultura (adimensional) e a  $ET_0$  é a evapotranspiração da cultura de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

#### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO METRIC

O satélite Landsat utiliza sensores OLI o qual estima a radiância espectral dos alvos e armazena em formatos de níveis cinza (NC), seus valores variam de 0 a 255 (8 bits), as bandas 2, 3, 4, 5 e 7 (respectivamente, azul, verde, vermelho, IV próximo, IV médio, IV médio) onde tem uma resolução de 30 m e as bandas 10 e 11 (termal) a qual tem uma resolução espacial de 120 m, a imagem acima (Figura 1) representa as etapas para o cálculo

de diferentes elementos do balanço de energia, obtenção do fluxo de calor latente (LE) e da evapotranspiração (ET).



**FIGURA 1** - Fluxograma do modelo METRIC

Fonte: Autor (2020)

Para que seja estimada a evapotranspiração a partir de sensoriamento remoto foram necessárias correções geométricas para o cálculo dos parâmetros biofísicos utilizados no modelo. Após a aquisição das imagens, foi realizada a importação para o algoritmo METRIC incorporado no software ArcGis®10.6.2 obtendo como produto final os valores da evapotranspiração atual e o coeficiente da cultura atual ( $K_{c_{atual}}$ ) para a área de estudo.

Para que fosse mensurada a evapotranspiração a partir das imagens obtidas pelo satélite, foi necessário o uso de algumas equações, sendo a primeira delas a calibração radiométrica, que estabelece os cálculos da radiância espectral de cada banda ( $\lambda_i L$ ), isso é, a conversão de cada pixel da imagem de nível de cinza para radiância espectral monocromática. A radiância representa a energia solar que é refletida por cada pixel, por unidade de área, tempo, ângulos sólidos e comprimentos de onda, medida ao nível do satélite Landsat para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, já para a banda 6 o valor da energia emitida por cada pixel é foi determinado conforme a equação 2 de Markham; Baker (1987).

$$L\lambda_i = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} NC \quad (2)$$

Em que,  $a$  representa radiância espectrais mínimas e  $b$  representa radiância espectrais máxima ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$  conforme a tabela 1),  $NC$  representa o nível de cinza e  $i$  corresponde as bandas (1, 2, 3, 4, 5 e 7) do satélite Landsat 8 sensores TM.

**TABELA 1** - Descrição das bandas do Mapeador Temático (OLI) do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração para albedo e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA)

Bandas	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}^{-1}$ )	Coefficiente de calibração ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )	Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera - Esun ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )
Band 1 - Coastal aerosol	0,43 - 0,45	-	1895,60
Band 2 - Azul	0,45 - 0,51	0,301	2004,60
Band 3 - Verde	0,53 - 0,59	0,273	1820,70
Band 4 - Vermelho	0,64 - 0,67	0,233	1540,40
Band 5 - Infravermelho Proximo (NIR)	0,85 - 0,88	0,143	951,20
Band 6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	0,037	247,60
Band 7 - SWIR 2	2,11 - 2,29	0,013	85,50
Band 8 - Pancromática (PAN)	0,50 - 0,68	-	724,00
Band 9 - Cirrus	1,36 - 1,38	-	367,00
Band 10 - Infravermelho Termal (TIRS)	10,60 - 11,19	-	-
Band 11 - Infravermelho termal (TIRS)	10,50 - 12,51	-	-

Fonte: Van Hellemont; Ruddick (2014)

A reflectância monocromática de cada banda ( $\rho_{\lambda i}$ ), é o entendimento entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente, para obter esse dado, usamos a equação 3, proposta por Allen et al. (2002).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos \theta \cdot dr} \quad (3)$$

Onde,  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda,  $k_{\lambda i}$  é a Irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ),  $dr$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (em unidade astronômica – UA) equação 4, dada por Iqbal (1983).

$$dr = 1 + 0,033 \cos \left( \frac{DS2\pi}{365} \right) \quad (4)$$

Onde,  $\theta$  é o ângulo de incidência da radiação solar foi obtido em cada pixel mediante o uso de MNT e equação 5, proposta por Duffie; Beckman (1991).

$$\begin{aligned} \cos \Theta = & \sin(\delta) \sin(\varnothing) \cos(s) - \sin(\delta) \cos(\varnothing) \sin(s) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(\varnothing) \cos(s) \\ & \cos(\varpi) + \cos(\delta) \sin(\varnothing) \sin(s) \cos(\gamma) \cos(\varpi) + \cos(\delta) \sin(s) \sin(\gamma) \sin(\varpi) \end{aligned} \quad (5)$$

Onde  $\delta$  é a inclinação do sol,  $\varnothing$  é a latitude do pixel (positivo no hemisfério norte é

negativo no hemisfério sul),  $s$  é a inclinação da superfície, onde  $s = 0$  para superfície horizontal e  $s = \pi/2$  rad para inclinação vertical ( $s$  sempre será positivo e representa a inclinação em qualquer direção),  $\gamma$  é o ângulo do aspecto da superfície, em que  $\gamma = 0$  para inclinação orientada para o sul,  $\gamma = -\pi/2$  rad para inclinação orientada para o leste,  $\gamma = +\pi/2$  rad quando inclinado para o oeste e  $\gamma = \pm \pi$  rad para inclinação orientada para o norte. O parâmetro  $\varpi$  é o ângulo horário, com  $\varpi = 0$  ao meio-dia solar negativo, negativo pela manhã e positivo no período da tarde.

O valor do albedo da superfície ( $\alpha$ ) é considerado primeiramente em determinar os pesos para as bandas espectrais em cada pixel da imagem. O albedo corresponde à somatória das reflectância ponderadas das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do sensor TM, conforme equação 6 segundo Tasumi et al. (2008).

$$\alpha = \sum_{i=1}^6 (rs_i * w_i) \quad (6)$$

Onde  $rs_i$  é a reflectância corrigida atmosféricamente, correspondente a banda  $i$ ,  $w_i$  é o peso da banda  $i$ .

O peso atribuído á banda  $i$  é igual a toda radiação solar de onda curta que chega na superfície terrestre integrada no intervalo da banda  $i$  do sensor TM, conforme a equação 7.

$$W_i = \frac{\int_{LO_i}^{UPI} R_{s\downarrow} * d\lambda}{\int_{0,3}^{4,0} R_{s\downarrow} * d\lambda} \quad (7)$$

Onde  $UPI$  e  $LO_i$  é o limite superior de cada faixa espectral da banda  $i$  ( $\mu\text{m}$ ),  $LO_i$  é o limite inferior de cada faixa espectral da banda  $i$  ( $\mu\text{m}$ ); 0,3 a 4,0 é o intervalo de comprimento de onda curta do espectro eletromagnético ( $\mu\text{m}$ );, correspondendo as faixas do ultravioleta, visível e infravermelho próximo e médio,  $R_{s\downarrow}$  corresponde ao fluxo de energia radiante de onda curta incidente ( $\text{W.m}^{-2}$ )

As faixas espectrais delimitadas por  $UPI$  e  $LO_i$  incluem regiões espectrais não sensoriadas pelo TM, dentro do intervalo de comprimento de onda curtas. A inserção destas regiões espectrais no cômputo dos fatores pode permitir uma melhor definição da contribuição relativa de cada banda espectral para a estimativa do albedo da superfície, segundo Tasumi et al. (2008). A Tabela 2 indica os coeficientes de ponderação de cada banda do TM e as faixas espectrais assimilados entre os limites  $UPI$  e  $LO_i$  arbitrariamente determinada em função das brechas espectral visto entre as faixas espectrais das bandas do

sensor.

**TABELA 2** – Faixas espectrais das bandas do TM e das compreendidas entre os limites UPi e LOi e respectivos fatores de ponderação

Banda	Faixa espectral compreendida entre os limites UPi e LOi (µm)	Peso Wi
1	0,300 - 0,520	0,254
2	0,520 - 0,615	0,149
3	0,615 - 0,725	0,147
4	0,725 - 1,225	0,311
5	1,225 - 1,915	0,103
6	-	-
7	1,915 - 4,000	0,036

Fonte: Tasumi et al. (2008).

Após a transformação dos valores de reflectância aparente ( $r_a$ ) para reflectância atmosféricamente corrigida ( $r_s$ ), foi necessário o calculo do albedo da superfície para determinar o efeito de espalhamento e absorção de radiação pela atmosfera, desse modo utilizamos a equação 8.

$$r_{s,i} = \frac{r_{a,i} - r_{t,i}}{\tau_{in,i} * \tau_{out,i}} \quad (8)$$

Onde  $r_{s,i}$  é a reflectância espectral corrigida dos efeitos atmosféricos na banda  $i$ ;  $r_{a,i}$  é a reflectância espectral aparente da banda  $i$ ;  $r_t$  é a reflectância de trajetória (radiação difusa espalhada na atmosfera em direção ao sensor) na banda  $i$ ;  $\tau_{in,i}$  representa os valores da transmitância da atmosfera na direção da superfície de cada banda  $i$  e  $\tau_{out,i}$  representa os valores da transmitância da atmosfera em direção ao sensor para cada banda  $i$ .

Para determinar a transmitância atmosférica nas duas direções, utilizamos o conhecimento da umidade relativa do ar no período em que o satélite estiver passando sobre a área de estudo, a transmitância da atmosfera em direção a superfície ( $\tau_{in}$ ) utilizando a equação 9.

$$\tau_{in} = c_{1,i} * \exp \left[ \frac{c_{2,i} Par - c_{3,i} W - c_{4,i}}{\cos \theta} \right] + c_{5,i} \quad (9)$$

Onde,  $Par$  é a pressão atmosférica (kPa), cujo seu valor foi determinado pela equação 10;  $\Theta$  é o ângulo zenital solar, determinado pela equação 5;  $W$  é referente a água precipitada na atmosfera (mm), a qual foi determinada pela equação 11;  $c_{1,i}$  a  $c_{5,i}$  são parâmetros constantes determinado para cada banda  $i$  do sensor TM.

$$Par = 101,3 \left( \frac{Tar - 0,0065 * h}{Tar} \right)^{5,26} \quad (10)$$

Onde  $Tar$  representa a temperatura do ar (K) e  $h$  é a altitude média da superfície em relação ao nível médio do mar (m).

$W$  representa a função da quantidade de água precipitável em um ponto da imagem (local da estação agrometeorologica), ela foi calculada pela equação 11, proposta por Garrison e Adler (1990)

$$W = 0,14 * ea \text{ par} + 2,1 \quad (11)$$

Onde  $ea$  é a pressão de vapor de água (KPa) e  $W$  e dado em mm.

A transmitância da atmosfera na direção do sensor ( $\tau_{out}$ ) foi obtida pela equação 12

$$\tau_{out,i} = c_{1,i} * \exp \left[ \frac{c_{2,i} Par - c_{3,i} W - c_{4,i}}{\cos \eta} \right] + c_{5,i} \quad (12)$$

Onde,  $\eta$  representa o ângulo de pretendido pelo sensor. O ângulo pretendido pelo sensor e muito TM é muito próximo de 0, com isso o cosseno de  $\eta$  sera aproximadamente igual a 1.

Os critérios de  $c_{1,i}$  a  $c_{5,i}$  foram definidos por Tasumi et al. (2008) através do uso do modelo de transparência radiativa SWARTS2 (Simple Model of Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) e do modelo de regressão simples, demonstrado na tabela 3.

Segundo Tasumi et al. (2008), após determinar o valor da transmitância da atmosfera na direção da superfície e do sensor para cada banda  $i$ , será realizado os cálculos da reflectância de trajetória ( $\tau_t, i$ ) para cada uma das bandas do OLI/TIRS, onde esse dado foi obtido pela equação 13 e do dado MOD02 (Produto MODIS de radiância).



$$rt, i = Cb * (1 - \tau in, i) \quad (13)$$

Onde, Cb é um parâmetro determinado para cada banda i do sensor OLI (Tabela 1).

**TABELA 3** – Coeficiente de calibração C1 a C5 e Cb, para bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do OLI/TIRS / Landsat - 8

Coeficiente	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
C1	0,987	2,319	0,951	0,375	0,234	0,365
C2	-0,00071	-0,00016	-0,00033	-0,00048	-0,00101	-0,00097
C3	0,000036	0,000105	0,00028	0,005018	0,004336	0,004296
C4	0,0880	0,0437	0,0875	0,1355	0,0560	0,0155
C5	0,0789	-1,2697	0,1014	0,6621	0,7757	0,639
Cb	0,640	0,310	0,286	0,189	0,274	-0,186

Fonte: Tasumi et al. (2008)

O índice de vegetação da diferença normatizada (NDVI), foi obtido através do entendimento das desigualdades e da somatória do infravermelho próximo (IV $\rho$ ) e do vermelho (V $\rho$ ), sendo assim utilizamos a equação 14 para estimar o seu valor, segundo Rouse et al. (1973).

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (14)$$

Onde, NDVI refere-se a um indicador sensível da quantidade e da situação da vegetação verde,  $\rho_{iv}$  corresponde as bandas 4 e  $\rho_v$  corresponde a banda 3 do OLI/TIRS Landsat 8.

Os valores do NDVI alternam de -1 a +1, sendo que quando a superfície apresenta cobertura por vegetações esses valores se encontram entre 0 e 1, e quando apresenta água e nuvens o seu valor é menor que 0.

Para que se obtenha o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI), ou seja, o índice que busca amenizar os efeitos do solo que estão em segundo plano, com isso utilizou a equação 15, segundo Huete e Warrick (1990).

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L + \rho_{iv} + \rho_v)} \quad (15)$$

Onde, L é a constante, Segundo Huete; Warrick (1990) e Boegh et al. (2002) o valor mais constante na literatura é de 0,5.

O Índice de Área Foliar (IAF) é estabelecido através do entendimento entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, desse modo pode se afirmar que o IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, onde determinamos pela equação 16 obtida por Allen et al. (2002).

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (16)$$

Na temperatura da superfície se utiliza a equação de Planck invertida a qual é válida para um corpo negro, desse modo foi necessário incluir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal  $\epsilon_{NB}$ , segundo Allen et al. (2002), onde foi considerado a emissividade no domínio da banda larga  $\epsilon_0$  (6 – 14  $\mu m$ ) para o cálculo da radiação de onda longa emitida para cada pixel, desse modo a emissividades  $\epsilon_{NB}$  e  $\epsilon_0$ , foram obtidas, para  $NDVI > 0$  e  $IAF < 3$ , conforme as equações 17 e 18.

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 IAF \quad (17)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 IAF \quad (18)$$

Para os pixels cujo valor de  $IAF \geq \epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ . Para corpos de água ( $NDVI < 0$ ), foram utilizados os valores  $\epsilon_{NB} = 0,99$  e  $\epsilon_0 = 0,895$ , conforme utilizado por Allen et al. (2002).

Para que se obtenha a temperatura de superfície (TS), foi utilizado a radiância espectral da banda termal  $L_{\lambda,6}$  e a emissividade  $\epsilon_{NB}$ , conforme determinada na etapa anterior. Dessa maneira, obtemos a temperatura da superfície (K), usando a equação 19.

$$Ts = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (19)$$

Onde  $K1 = 607,76$  ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) e  $K2 = 1260,56$  k, constantes de calibração da banda termal do OLI/TIRS /Landsat 8, segundo Allen et al. (2002).

A radiação de onda que é enviada pela superfície  $RL\uparrow$  ( $Wm^{-2}$ ) foi obtido através da equação 20 de Stefan-Boltzman.

$$R_L \uparrow = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (20)$$

Onde,  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada pixel,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) e  $T_s$  é a temperatura da superfície (K).

A radiação de onda curta incidente,  $R_{s\downarrow}$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ), é a corrente da radiação solar, podendo ser direta ou difusa que atinge a superfície da terra, para a determinação do  $R_{s\downarrow}$  em condições de céu claro, usando a equação 21 (ALLEN et al., 2002).

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

Onde,  $S$  corresponde a constante solar ( $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ),  $\theta$  corresponde ao ângulo zenital solar,  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e  $\tau_{sw}$  corresponde a transmissividade atmosférica. O valor de  $R_{s\downarrow}$  em áreas de estudo relativamente pequenas pode ser considerado constante.

A radiação de onda longa incidente é transferida pela atmosfera em direção a superfície  $R_{L\downarrow}$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ), calculada através da equação 22 de Stefan-Boltzman.

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (22)$$

Onde,  $\epsilon_a$ , refere-se a emissividade obtida por  $\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln\tau_{sw})^{0,09}$  segundo Allen et al. (2002), refere-se a constante de Stefan-Boltzman e  $T_a$  é a temperatura do ar (K).

O saldo de radiação a superfície  $R_n$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) é a desigualdade entre irradiância solar incidente e a radiação infravermelha distante, que é refletida ou emitida pela superfície da terra, calculado através do cálculo do balanço de radiação conforme podemos observar na equação 23.

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (23)$$

Onde,  $R_{s\downarrow}$  é a radiação de ondas curtas incidente ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\alpha$  é o albedo corrigido de cada pixel (estimado pelo método de Liang (2000)),  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida por cada pixel ( $\text{W m}^{-2}$ ) e  $\epsilon_0$  refere-se a emissividade de cada pixel.

O fluxo de calor no solo  $G$  ( $\text{W m}^{-2}$ ), é a quantidade de calor que é deslocada no solo,

no algoritmo METRIC, o fluxo de calor no solo foi determinado para cada pixel e pode ser obtido através da equação 24 desenvolvida por Bastiaanssen (2000), onde seus valores foram representados próximo ao meio-dia.

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 \text{NDVI}^4) \right] \text{Rn} \quad (24)$$

Em que  $T_s$  é o valor da temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha$  refere-se ao albedo da superfície, NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada, onde todos serão computados pixel a pixel onde e calculada para cada pixel. Para o efeito de correção dos valores do fluxo de calor para corpos de água ( $\text{NDVI} < 0$ ), onde poderá ser utilizada a seguinte expressão:  $G = 0,3\text{Rn}$ , conforme Silva, Lopes, Azevedo (2005a) estudaram e  $G = 0,5 \text{Rn}$ , segundo Allen et. al (2002), onde foi definido mais a frente neste trabalho.

O fluxo de calor sensível  $H$  ( $\text{W m}^{-2}$ ), considerado também como o cerne do METRIC, é referenciado como uma troca de calor para o ar, através de uma relação linear entre a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) e a diferença de temperatura entre superfície e atmosfera ( $\Delta T$ ). Segundo Bastiaanssen et al. (1998), o fluxo de calor é estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície, onde ele usa uma calibração interna da diferença da temperatura próxima a ela e na superfície, assim se usamos a equação 25 para determinar o valor do fluxo de calor sensível.

$$H = \rho c_p \frac{(a+bT_s)}{r_{ah}} \quad (25)$$

Sendo que  $\rho$  é a densidade do ar ( $1,15 \text{kgm}^{-3}$ ),  $c_p$  refere-se ao calor específico do ar ( $1004 \text{JKg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $a$  e  $b$  são constantes de calibração da diferença de temperatura,  $T_s$  é a temperatura da superfície (K) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $\text{sm}^{-1}$ ).

Para o cálculo do fluxo de calor sensível ( $H$ ), foi feito o recolhimento de dados de uma estação meteorológica na área de estudo (Cristalina – Goiás) para obter a velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) ao nível de 2 metros de altura média da vegetação (m) no local onde foi medido a velocidade do vento. Foi necessário para determinar o valor de  $H$  o conhecimento de dois pixels, sendo eles o pixel ancoras para determinação da variação da temperatura ( $dT$ ), e o pixel de resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ) em todos os pixels na área de

estudo. A princípio a resistência aerodinâmica,  $r_{ah}$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) foi determinada pela equação 26, reconhecendo a atmosfera em condições de estabilidade neutra.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_2}\right)}{u_* K} \quad (26)$$

Onde,  $z_1$  e  $z_2$  refere-se a altura (m), acima da superfície,  $u_*$  é a velocidade de fricção ( $\text{m}^{-1}$ ) e  $K$  é a constante de Von Karman (0,41).

O coeficiente de rugosidade local  $Z_{0m}$  é determinado em função da vegetação conforme afirmado por Brutsaert (1982), desse modo se utiliza a equação 27.

$$Z_{0m} = 0,12 h \quad (27)$$

Allen et al. (2002) Consideram  $z = 0,30\text{m}$ , obtendo assim  $Z_{0m} = 0,036\text{m}$ .

A velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) foi obtida através de um perfil algoritmo do vento quando as condições de estabilidades são neutras, assim utilizamos a equação 28 para determinar seu valor.

$$u_* = \frac{K u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (28)$$

Onde,  $K$  é a constante de Von Karman,  $u_x$  é a velocidade do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) na altura de  $z_x$  (m) e  $Z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade (m)

Ainda considerando a neutralidade da atmosfera, foi obtido a velocidade do vento  $u_{200}$  ( $\text{ms}^{-1}$ ), levando em consideração o nível de  $Z = 200$  onde os efeitos da rugosidade foram desprezíveis devido a sua diferença de altitude na bacia. Desse modo o  $u_{200}$  foram determinado pela equação 29.

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)}{K} \quad (29)$$

A velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) para cada pixel foi determinada com a equação 30.

$$u_* = \frac{K u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)} \quad (30)$$

Onde o  $Z_{0m}$  foi obtido em função do SAVI, conforme a equação 31, desenvolvida por Bastiaanssen (2000),

$$Z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62 SAVI) \quad (31)$$

Nas proximidades da superfície as diferenças de temperatura  $Dt$  ( $^{\circ}C$ ) para cada pixel, foi determinada pelo algoritmo SEBAL, por meio de uma relação linear entre a diferença de temperatura ( $dT$ ) e a temperatura de superfície ( $T_s$ ), conforme a equação 32.

$$dT = a + bT_s \quad (32)$$

Onde  $a$  e  $b$  são coeficiente de correlação, definidos pelo algoritmo SEBAL pelo pixel âncora quente e âncora frio.

Conforme afirmado por Allen et al. (1998), o METRIC tem algumas similaridades com o algoritmo SEBAL, como exemplo a determinação do  $Dt$  para pixel quente, onde é calculado por meio do balanço hídrico diário do solo, como proposta pela FAO 56, em situações em que o solo se encontra exposto para a confirmação da  $ET = 0$ , ou para identificação de valores superiores ligados com os eventos de umidade. Assim o METRIC utilizou as equações 33 e 34 para definir o valor do fluxo de calor sensível ( $H$ ) em pixel quente e frio respectivamente.

$$H_{quente} = (Rn - G)_{quente} - LE_{quente} \quad (33)$$

$$H_{frio} = (Rn - G)_{frio} - LE_{frio} \quad (34)$$

Áreas que apresentam uma cobertura densa ( $IAF > 4$ ) caracterizam como frios em uma imagem de satélite, desse modo o  $LE_{frio}$  é fundamentado em um pixel frio representativo representado na imagem, assim usamos a equação 35 para determinar o valor de  $LE_{frio}$ .

$$LE_{frio} = 1.05. ET_0. \lambda \quad (35)$$

Onde,  $ET_0$  é baseado na cultura que se encontra na área. O  $\lambda$  foi obtido através da equação 36.

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 (T_s - 253,15)]. 10^6 \quad (36)$$

Onde,  $T_s$  é a temperatura de superfície dada por Kelvin.

O gradiente de temperatura sobre o pixel frio,  $dT_{\text{frio}}$ , foi definido através da equação 37.

$$dT_{\text{frio}} \frac{H_{\text{frio}} \Gamma_{\text{ah}}}{\rho_{\text{ar}} \cdot C_p} \quad (37)$$

Os coeficientes  $a$  e  $b$  foram determinados com o uso de dois pares de valores para o  $Dt$  e  $T_s$ , como pode se observar nas equações 38 e 39.

$$\mathbf{a} = \frac{dT_{\text{quente}} - dT_{\text{frio}}}{T_{s,\text{quente}} - T_{s,\text{frio}}} \quad (38)$$

$$\mathbf{b} = \frac{dT_{\text{quente}} - \mathbf{a}}{T_{s,\text{quente}}} \quad (39)$$

Segundo Bastiaanssen (1995); Allen et al. (2002) e Timmermans et al. (2007) o comprimento  $L$  (m) de Monin-Obukhov, e usado para a definição das condições de estabilidade da atmosfera, e pode ser calculada em função dos fluxos de calor e de momentum, obtido através da equação 40.

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (40)$$

Onde,  $\rho$  é a densidade do ar ( $1,15 \text{ kgm}^{-3}$ );  $c_p$  é o calor específico do ar;  $u_*$  é a velocidade de fricção de cada pixel das imagens ( $\text{ms}^{-1}$ );  $T_s$  é a temperatura da superfície (K);  $g$  é o módulo do campo gravitacional terrestre ( $9,81 \text{ ms}^{-2}$ ); e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $\text{Wm}^{-2}$ ).

Os valores obtidos em  $L$  definem as condições de estabilidade da seguinte forma: Se  $L < 0$  a atmosfera é considerada instável; se  $L > 0$  a atmosfera é considerada estável; e se  $L = 0$  a atmosfera é considerada neutra, desse modo os valores de correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\psi_m$ ) e de calor ( $\psi_h$ ) dependerão das condições atmosféricas. Para definir esses valores de correção foram levar em conta as formulações abaixo propostas por

Bastiaanssen (1995); Morse et al. (2000); Allen et al. (2002); Silva; Bezerra (2006); Bezerra (2008).

Se  $L < 0$  (Condições de instabilidade):

$$\Psi_{m(200\text{ m})} = 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(200\text{ m})}}{2} \right) + \ln \left( \frac{1 + x_{(200\text{ m})}^2}{2} \right) - \arctg(x_{(200\text{ m})}) + 5\pi$$

$$\Psi_{h(2\text{ m})} = 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(2\text{ m})}^2}{2} \right)$$

$$\Psi_{h(0,1\text{ m})} = 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(0,1\text{ m})}^2}{2} \right)$$

Sendo:

$$x_{(200\text{ m})} = 1 - 16 \left( \frac{200}{L} \right)^{0,25}$$

$$x_{(2\text{ m})} = 1 - 16 \left( \frac{2}{L} \right)^{0,25}$$

$$x_{(0,1\text{ m})} = 1 - 16 \left( \frac{0,1}{L} \right)^{0,25}$$

Se  $L > 0$  (Condições de estabilidade):

$$\Psi_{m(200\text{ m})} = -5 \left( \frac{200}{L} \right)$$

$$\Psi_{m(2\text{ m})} = -5 \left( \frac{2}{L} \right)$$

$$\Psi_{m(0,1\text{ m})} = -5 \left( \frac{0,1}{L} \right)$$

Se  $L = 0$  (Condições de neutralidade):

$$\Psi_m = 0 \text{ e } \Psi_h = 0$$

O valor corrigido para a velocidade de fricção  $u^*$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) é foi através da equação 41.



$$u_* = \frac{u_{200} \cdot K}{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right) - \Psi_m(200)} \quad (41)$$

Onde,  $u_{200}$  é a velocidade do vento, a 200 m ( $\text{ms}^{-1}$ );  $K$  refere se ao valor da constante de von karman (0,41);  $Z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade para cada pixel (m); e  $\Psi_m(200)$  é a corrente da estabilidade para o transporte momentum a 100m.

O valor corrigido da aerodinâmica ao transporte de calor  $r_{ah}$  ( $\text{ms}^{-1}$ ), foi definido por meio da equação 42.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_2}\right) - \Psi_h(z_2) + \Psi_h(z_1)}{u_* \cdot K} \quad (42)$$

Onde  $z_2 = 2,0$  m;  $z_1 = 0,1$  m;  $\Psi_h(z_2)$  e  $\Psi_h(z_1)$  correspondem às correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 e 1,0 m, respectivamente.

O fluxo de calor latente  $LE$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) foi definido por meio da taxa de calor latente oferecida pela superfície devido o processo da evapotranspiração, seu valor foi mensurado através da desigualdade entre o fluxo de calor no solo, o saldo de radiação e o fluxo de calor sensível, conforme se observa na equação 43.

$$LE = R_n - G - H \quad (43)$$

Onde,  $LE$  é o fluxo de calor latente instantâneo ( $\text{W m}^{-2}$ ) ou seja, o seu valor no momento da passagem do satélite;  $R_n$  é o saldo de radiação ( $\text{W m}^{-2}$ );  $G$  é o fluxo de calor do solo ( $\text{W m}^{-2}$ ) e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ).

O valor do fluxo de calor latente apresenta uma facilidade em sua conversão para evapotranspiração real horária  $ET_h$  (mm), compreendendo o período de uma hora, segundo Tasumi (2003); Allen et al. (2007), onde foi calculada na equação 44.

$$ET_h = 3600 \cdot \frac{LE}{\lambda} \quad (44)$$

Onde,  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água ( $\text{JKg}^{-1}$ ) conforme obtida na equação 36 e  $LE$  é o fluxo de calor latente obtido na equação anterior.

Para realizar a conversão de evapotranspiração real horária (ETh) para a escala diária (ET24h), foi levado em consideração os métodos usados por Trezza (2002), Tasumi (2003) e Allen et al. (2007), eles considera ser a razão entre a ETh e a ET0,h onde serão validas em um período de 24 horas, obtidos pela equação 45.

$$ET_{24h} = F \cdot ET_{0,24H} \quad (45)$$

Onde, ET<sub>0</sub>24h é a evapotranspiração de referência diária da FAO (mm dia<sup>-1</sup>), F é a fração de referência relativa horária (igual a razão entre ETh e ET0,h). Os valores da ET024h, foram determinados através da integração dos valores diários de evapotranspiração horária calculada pela equação 46 proposta por Allen et al. (1998).

$$ET_h = \frac{0,048 (Rn-G) + \gamma \frac{37}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (46)$$

Onde, ET0h é a evapotranspiração de referência horária (mm.h<sup>-1</sup>); Rn corresponde ao saldo de radiação (MJ.m<sup>-2</sup>. h<sup>-1</sup>); G é o fluxo de calor do solo (MJ.m<sup>-2</sup>. h<sup>-1</sup>); T é a temperatura média horária a 2 metros de altura (°C); u<sub>2</sub> refere-se a velocidade média horária do vento a 2 metros (m.s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> é a pressão real de vapor (kPa); γ é a constante psicrométrica (KPa °C<sup>-1</sup>) e Δ é a curva de pressão de vapor (KPa °C<sup>-1</sup>).

Após obter o valor da evapotranspiração por hora, os resultados foram adaptados para a obtenção dos valores da evapotranspiração diário (ET0).

Para determinar a evapotranspiração atual (ETa) levamos em base o fluxo de calor latente, obtido pelo termo residual do balanço de energia superficial conforme equação 2.

### 3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliar o algoritmo METRIC na determinação da evapotranspiração foi realizado a comparação com os valores estimados pelo método FAO com os obtidos pelo algoritmo METRIC conforme proposto por Allen et al. (2007), a mesma avaliação foi realizada por Brandão (2019) a qual aplicou o erro padrão de estimativa (EPE) (equação 47). Para avaliar os resultados obtidos na evapotranspiração foi utilizado as equações: Erro do

quadrado médio (EQM) (equação 48), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (equação 49) e o erro médio absoluto (EMA) (equação 50).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n-1}} \quad (47)$$

$$EQM = \sqrt{\sum(O_i - E_i)^2} \quad (48)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}} \quad (49)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum |O_i - E_i| \quad (50)$$

Onde,  $O_i$  é o valor calculado pelo método FAO 56 Penman-Monteith (mm);  $E_i$  representa o valor estimado da evapotranspiração pelo algoritmo METRIC (mm);  $O$  é a media dos valores observados (mm) e o  $n$  é o número de observações.

Para determinar a aproximação dos dados estimados com os dados calculados, foi utilizado a equação do índice de concordância “d” (equação 51), os resultados obtidos variam de 0 (nenhuma concordância) para 1 (concordância total) e podem ser interpretados pela Tabela 4 proposta por Castro et al. (2010); por fim foi calculado a eficiência do modelo METRIC através da equação 52, onde o quanto mais próximo de 1 for o resultado entende-se que mais eficiente é o modelo.

$$d = 1 = \left[ \frac{\sum(E_i - O_i)^2}{\sum(|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (51)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (52)$$

**TABELA 4** – Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança.

<b>Valor de c</b>	<b>Desempenho</b>
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental (2010).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 apresenta os dados médios da evapotranspiração atual (ETa), obtidos pelo algoritmo METRIC em comparação com os dados obtidos em campo, estimado pelo método padrão FAO 56. Os dados da evapotranspiração foram obtidos de 5 datas, (referente as passagens do satélite) durante o ciclo da cultura do milho.

**TABELA 5** – Coeficiente da cultura do milho (Kc) obtidas pelo produtor e pelo algoritmo METRIC.

Datas	DAP	Kc produtor	Kc atual Metric
08/03/2019	13	0,74	0,89
02/04/2019	37	0,97	0,90
25/04/2019	59	0,97	1,15
11/05/2019	74	0,86	0,94
20/05/2019	82	0,50	0,79

Fonte: Autor (2020).

Observa-se no erro absoluto na Tabela 6 que os valores da evapotranspiração atual do algoritmo METRIC ficaram próximos aos determinados pelo método FAO 56 a partir dos Kc's utilizados pelo produtor, onde o erro absoluto variaram entre 0,05 mm e 1,01 mm, o alto valor observado no dia 25/04/2019 pode ser devido a ocorrência de sombras na imagem obtida.

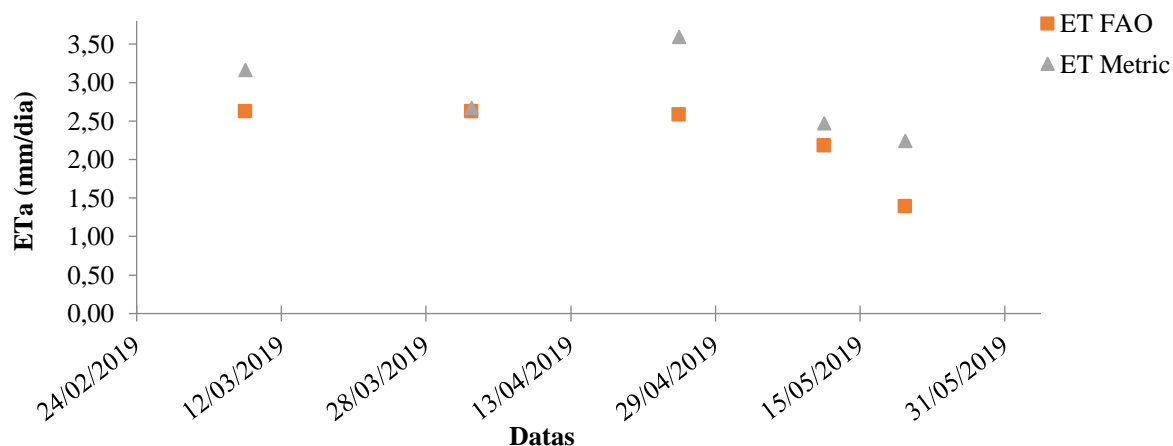
**TABELA 6** – Evapotranspiração atual (ETa) da cultura do milho comparadas pelo método de FAO 56 utilizado pelo produtor e pelo algoritmo METRIC, juntamente com a diferença entre os dois expressos no erro absoluto (Erro abs).

Datas	DAP	ET <sub>0</sub> (mm.dia <sup>-1</sup> )	ETa produtor (mm.dia <sup>-1</sup> )	ETa Metric (mm.dia <sup>-1</sup> )	Erro abs (mm.dia <sup>-1</sup> )
08/03/2019	13	3,56	2,62	3,16	0,54
02/04/2019	37	2,96	2,62	2,67	0,05
25/04/2019	59	3,11	2,58	3,59	1,01
11/05/2019	74	2,64	2,18	2,47	0,29
20/05/2019	82	2,83	1,39	2,24	0,85

Fonte: Autor (2020).

Na Figura 2 pode-se observar a diferença dos dados obtidos pelo algoritmo METRIC em comparação aos obtidos pelo Kc's utilizado pelos produtores, se nota que os valores são

similares, na fase inicial, intermediária e no começo da fase final da cultura do milho irrigado, mostrando concordância entre esses dois métodos.



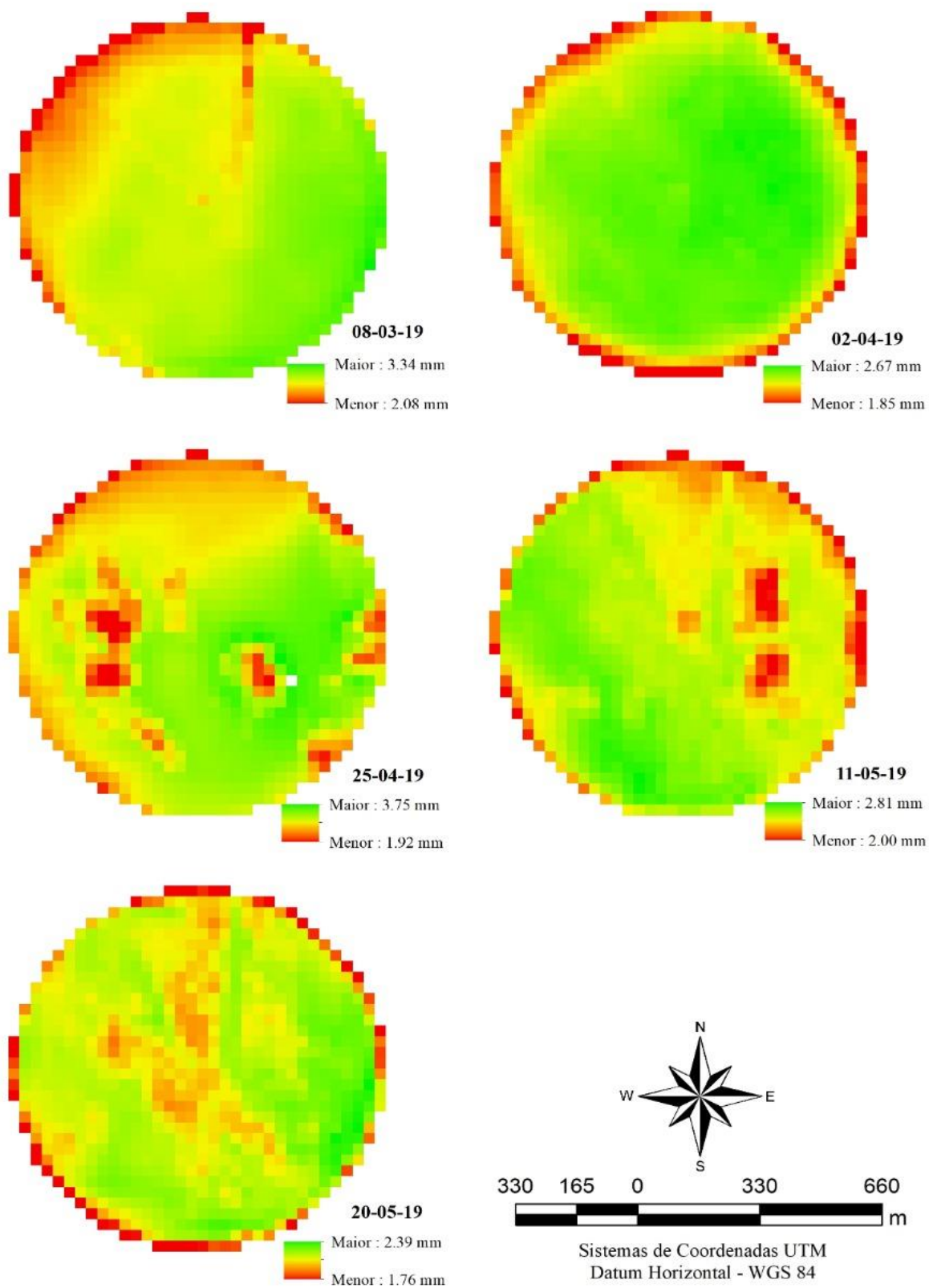
**FIGURA 2** - Comparativo entre ETa obtida pelo modelo METRIC e a ETa obtida a partir dos Kc's utilizados pelo produtor, durante o ciclo da cultura do milho cultivada em área de pivô central em Goiás.

Fonte: Autor (2020).

O algoritmo METRIC, apresentou resultados satisfatórios, assim como observado no trabalho realizado por UDA (2016) para a evapotranspiração real do rio Iguaçu, e por Oliveira et al. (2014) na estimativa de balanço de energia e evapotranspiração no cultivo da cana-de-açúcar com imagens do Landsat. Costa (2019), ao aplicar o algoritmo METRIC nos cultivos de feijão caupi, feijão carioca e no café irrigados e por Warren (2013) na estimativa da evapotranspiração real do feijoeiro.

Conforme afirma UDA (2016), os dados obtidos pelo algoritmo METRIC dependem da resolução das imagens de satélites utilizadas, sendo assim a imagem das bandas infravermelho termal (bandas 10 e 11) é o principal fator limitante neste método, por apresentar uma resolução espacial das imagens de satélite inferior às demais bandas e a resolução temporal das imagens, o autor cita que um ponto negativo do algoritmo, o qual foi verificado em diversos outros projetos foi a dificuldade na calibração em relação a escolhas dos pixels ancoras, dificultando a escolha dos pixels adequados e representativos especificamente para cada local.

A Figura 3 mostra os mapas dos valores obtidos para a área em análise (Pivo 2), possibilitando a observação detalhada da evapotranspiração em diferentes estágios fisiológicos da cultura do milho, onde também pode ser observado os setores em que a evapotranspiração difere das demais áreas do pivô.



**FIGURA 3** - Mapas dos valores da evapotranspiração (ET), obtidos pelo algoritmo METRIC referente ao período de estudo.

Fonte: Autor (2020).

Na Tabela 7 pode se observar os parâmetros e resultados estatísticos, erro médio absoluto (EMA), erro do quadrado médio (EQM), erro padrão da estimativa (EPE), raiz do erro do quadrado médio (RMSE) índice de concordância de Willmott “d”, coeficiente de concordância simples de Person “r”, índice de confiança ou desempenho “c”.

**TABELA 7** - Parâmetros estatísticos para os valores de ETa METRIC comparado a ETc FAO.

EMA (mm/dia)	EQM (mm/dia)	EPE (mm/dia)	RMSE (mm/dia)	d	r	c	Classificação
0,69	0,42	0,73	0,65	0,62	0,73	0,45	"mau"

Fonte: Autor (2020).

De maneira geral, os resultados da ETa METRIC estiveram em concordância aceitável quando comparados com a metodologia de estimativa padrão da ETc (FAO 56), a partir dos Kc's utilizados pelo produtor, com valores de EMA= 0,69 mm/dia e EPE= 0,73 mm/dia, valores muito baixos que, na prática, indicam uma diferença de lâmina de menos de um milímetro. O EQM também foi reduzido, com valor médio de 0,42 mm/dia. Para o RMSE o valor médio foi de 0,65 mm/dia. Segundo Souza (2016), tais valores dos erros na estimativa ETc pelo SAFER é satisfatoriamente aceitável para gestão de recursos hídricos, especialmente considerando o baixo custo da aplicação do método em larga escala.

A correlação de Person “r” apresentou valor de 0,73, considerado uma correlação muito forte, já que o índice perfeito é 1. O índice “d” de Willmott, foi igual a 0,62, o qual indica média precisão do modelo METRIC, prejudicado pelo valor de ETa obtido no dia 25/04 que teve erro absoluto médio superior a 1 mm, visto o reduzido custo de aplicação do modelo e as possibilidades de aplicação do modelo METRIC. O pior resultado para aplicação do modelo METRIC foram os referentes a aplicação do índice “c”, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), cujo resultado foi de 0,45 sendo classificado como “mau” segundo a tabela 4 proposta por Castro et al. (2010). De acordo com os dados obtidos, a estimativa pelo algoritmo METRIC se mostrou adequado para a avaliação do consumo de água da cultura e na observação da variabilidade espacial do consumo de água em talhões ou áreas que deveriam ser agronomicamente homogêneas, quando combinado com outros métodos de manejo de irrigação. O modelo METRIC tem sido amplamente utilizado para estimativas de evapotranspiração em áreas heterogêneas de grandes dimensões. Sua aplicação para avaliação da estimativa da evapotranspiração atual da cultura nas condições citadas mostra-se promissor, necessitando de mais testes em campo para aumentar a sua confiabilidade.



## **6. CONCLUSÃO**

A partir da aplicação do algoritmo METRIC em dados obtidos a partir de sensoriamento remoto foi possível estimar a evapotranspiração atual com relativa precisão. O algoritmo METRIC mostra-se promissor para uso na estimativa de evapotranspiração atual de cultura, contudo recomenda-se a aplicação em outras áreas e culturas para avaliar a sua confiabilidade.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, p. D05109, 1998.
- 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**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- ALMEIDA, B. M.; ARAÚJO, E. M.; CAVALCANTE JUNIOR, E. G; OLIVEIRA, J. B. Comparação de métodos de estimativa da ETo na escala mensal em Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.93-98, 2010.
- ARMANI, F. A. S., DE FREITAS, L. A., MOREIRA, V. S. Avaliação do método de turc para a estimativa da evapotranspiração de um ambiente litorâneo. **Revista Técnico-Científica**, n. 14, 2018.
- BARBOZA, G. C., TEIXEIRA FILHO, J. Transpiração foliar e condutância estomática da cana-de-açúcar em função do clima e disponibilidade de água. **Irriga**, v. 22, n. 4, p. 675-689, 2017.
- BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. **SC-DLO**, 1995.
- BRUM, T. H. **Sustentabilidade hídrica para irrigação: projeto para captação de água pluvial**, 2019.
- CARVALHO, W. D. A. **Uso do sensoriamento remoto para o monitoramento hídrico da Barragem de Serrinha II no Semiárido Pernambucano**. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasil, 2019.
- CASTRO, F. D. S., PEZZOPANE, J. E., CECÍLIO, R. A., PEZZOPANE, J. R., XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.
- CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 115-127, 2013.
- COELHO, C. D. Estimativas da evaporação e da pegada hídrica dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Tucuruí-PA e Lajeado-TO / Clívia Dias Coelho. –Viçosa, MG, 2016.
- COSTA, J. D. O. Variabilidade espacial do consumo hídrico de cultivos irrigados utilizando sensoriamento remoto. **PhD Thesis**. Universidade de São Paulo, 2019.

CRUZ, G. H. T., DA COSTA SANTOS, L., DA COSTA SILVA, S. M., DOS REIS, E. F. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de rio verde-go. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 6, p. 1854-1861, 2017.

DE BRITO, T. G., FERREIRA, J. R., DE PAIVA, A. P., DA SILVA CAMPOS, P. H., E PERUCHI, R. S. **Otimização da rugosidade rt no fresamento de topo do aço abnt 1045. Usando projeto de parâmetros robustos (ppr)**, 2014.

DE DEUS, R. M., BAKONYI, S. M. C. O impacto da agricultura sobre o meio ambiente. Revista Eletrônica em Gestão, **Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 7, n. 7, p. 1306-1315, 2012.

DENSKI, A. P. N., BACK, Á. J. Tendência climatológica nos elementos meteorológicos e na evapotranspiração de referência de urussanga-sc (climatological trends in weather elements and in evapotranspiration series of urussanga, santa catarina state). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015.

DE SOUZA LIMA, R. N.; DE MELO RIBEIRO, C. B. **Determinação da evapotranspiração real diária a partir de imagens de satélite na bacia hidrográfica do rio Paraibuna**, 2018.

DOS SANTOS, M, **Proposta de um modelo de previsão de demanda de peças sobressalentes para navios de guerra da marinha do brasil**, 2016.

FAGGION, F.; OLIVEIRA, C. A. S.; CHRISTOFIDIS, D. **Uso eficiente da água: uma contribuição para o desenvolvimento sustentável da agropecuária**, 2009.

FERNANDES, D. S. F., HEINEMANN, A. B., PAZ, R., AMORIM, A. D. O. Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2010.

FILIPPINI ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. **Embrapa Clima Temperado-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2014.

FITZ, P. R. Geoprocessamento sem complicação. **Oficina de textos**, 2018.

FORMAGGIO, A. R., & SANCHES, I. D. A. Sensoriamento remoto em agricultura. **Oficina de Textos**, 2017.

FRANCO, A. C. Relações hídricas em plantas do cerrado: as plantas lenhosas do cerrado transpiram livremente. **CHBA PRADO and CA CASALI. Fisiologia Vegetal: práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição animal. Barueri: Malone**, p. 1-6, 2008.

FREITAS, P. A., OLIVEIRA, L. M. M., DE SALES BARBOSA, R. F., MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração de referência diária por diferentes modelos na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe (Pernambuco-Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 4, n. 1, 2018.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2011.

LIMA, N. S. **Estimativa de evapotranspiração potencial no semiárido baiano a partir das imagens termais.** Dissertação (Mestrado em Modelagem em Ciência da Terra e do Ambiente) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019.

MEDEIROS, R. M., SANTOS, D. C., SOUSA, F. A. S., GOMES FILHO, M. F. Análise climatológica, classificação climática e variabilidade do balanço hídrico climatológico na bacia do Rio Uruçui Preto, PI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p.652-664, 2013.

OLIVEIRA, B. S., MORAES, E. C., CARRASCO-BENAVIDES, M., MATAVELI, G. A. V., BERTANI, G., MOREIRA, E. P. **Avaliação do modelo METRIC na estimativa do balanço de energia e da evapotranspiração em áreas de cana-de-açúcar com imagens Landsat**, 2014.

ONGARATTO, J. M. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração para a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas.** 2019.

PAZ, V. P. S; TEODORO, R. E. F; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 4(3), 465-473, 2000.

PEREIRA, C. S., DOS SANTOS TARGA, M., DA SILVA ALMEIDA, A. A. **EVAPORAÇÃO LÍQUIDA EM RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS. Repositório de Ciências Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2019.

RABELLO, L. M. **Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos.** São Carlos: **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, 2009.

RAMALHO, M. C. C. **O aproveitamento hidroagrícola do Caia: caracterização, evolução e gestão da água. Soluções de gestão da rega aplicada a casos de estudo.** Tese de Doutorado. 2019.

SANTANA, A. C., FREITAS, D. A. F. D. **Educação ambiental para a conscientização quanto ao uso da água.** 2012.

SANTOS, G. O., DE LIMA, F. B., VANZELA, L. S. Balanço hídrico espacial das culturas inseridas na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Rita, noroeste Paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 1, p. 03-16, 2013.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. F.; PEREIRA FILHO, J. V.; FREITAS, C. A. S. Trocas gasosas em plantas de girassol submetidas à deficiência hídrica em diferentes estádios fenológicos. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 86-93, 2013.

SOUZA, C. D. D., FERNANDES, D. P., BARROSO, M. R., PORTES, T. D. A. Transpiração de espécies típicas do cerrado medida por transpirômetro de equilíbrio e porômetro. **Cerne**, v. 17, n. 4, p. 509-515, 2011.

SOUZA, J. M. F. **Aplicação do algoritmo SAFER na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de cerrado**. 2016.

TREZZA, R., ALLEN, R. G., TASUMI, M. Estimation of actual evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico using MODIS and landsat imagery with the METRIC model. **Remote Sensing**, v. 5, n. 10, p. 5397-5423, 2013.

TSCHIEDEL, M., FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 159-163, 2002.

UDA, P. K. **Evapotranspiração real da bacia do rio Iguaçu por meio do modelo METRIC**. 2016.

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