

Campinas, SP / Dezembro, 2024



Aplicação de métodos para estimativa de áreas irrigadas em Goiás usando imagens de satélite



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Territorial
Ministério da Agricultura e Pecuária***

ISSN 0103-7811 / e-ISSN 0000-0000

Documentos 159

Dezembro, 2024

Aplicação de métodos para estimativa de áreas irrigadas em Goiás usando imagens de satélite

*Janice Freitas Leivas
Antônio Heriberto de Castro Teixeira
Celina Maki Takemura
Edlene Monteiro Garçon
Rafael Mingoti*

***Embrapa Territorial
Campinas, SP
2024***

Embrapa Territorial
Av. Soldado Passarinho, nº 303
Fazenda Chapadão
13070-115, Campinas, SP
Fone: (19) 3211.6200
www.embrapa.br/territorial
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Lucíola Alves Magalhães

Secretária-executiva

Bibiana Teixeira de Almeida

Membros

André Luiz dos Santos Furtado

Celina Maki Takemura

Janice Freitas Leivas

Rafael Mingoti

Suzilei Francisca de Almeida Gomes Carneiro

Vera Viana dos Santos Brandão

Jaudete Daltio

Cristina Criscuolo

Rogério Resende Martins Ferreira

e Daniela Tatiane de Souza

Edição executiva

Bibiana Teixeira de Almeida

Revisão de texto

Bibiana Teixeira de Almeida

Normalização bibliográfica

Vera Viana dos Santos Brandão

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Suzilei Carneiro

Fotos da capa

Freepik

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Territorial

Aplicação de métodos para estimativa de áreas irrigadas em Goiás usando imagens de
satélite / Janice Freitas Leivas [et al.]. — Campinas: Embrapa
Territorial, 2024.

PDF (19 p.) : il. color. — (Documentos / Embrapa Territorial, ISSN 0103-7811; 159)

1. Agricultura irrigada. 2. Imagem de satélite. 3. Sustentabilidade. I. Leivas, Janice
Freitas. II. Teixeira, Antônio Heriberto de Castro. III. Takemura, Celina Maki. IV. Garçon,
Edlene Aparecida Monteiro. V. Mingoti, Rafael. VI. Título. VII. Série.

CDD (21. ed.) 631.587

Vera Viana dos Santos Brandão (CRB-8/7283)

© 2024 Embrapa

Autores

Janice Freitas Leivas

Meteorologista, doutora em Fitotecnia,
pesquisadora da Embrapa Territorial,
Campinas, SP

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Agrônomo, doutor em Ciências Ambientais,
professor da Universidade Federal de
Sergipe, Aracaju, SE

Celina Maki Takemura

Bacharel em Ciência da Computação,
doutora em Ciência da Computação,
pesquisadora da Embrapa Territorial,
Campinas, SP

Edlene Monteiro Garçon

Geógrafa, analista da Embrapa Territorial,
Campinas, SP

Rafael Mingoti

Engenheiro-agrônomo, doutor em
Irrigação e Drenagem, pesquisador da
Embrapa Territorial, Campinas, SP

Apresentação

A Embrapa Territorial, unidade temática da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), atua na viabilização de soluções de inteligência, gestão e monitoramento territorial para a agricultura brasileira. Em seus projetos e ações, a Unidade desenvolve e aplica métodos para propiciar aos gestores públicos e privados maior conhecimento da complexidade do mundo rural, seus desafios e oportunidades.

Nossas equipes multidisciplinares fazem amplo uso das geotecnologias para gerar, integrar e analisar dados de várias fontes e naturezas, em bases territoriais e em diversas escalas temporais, para extrair as melhores informações e apoiar ações estratégicas nas centenas de decisões tomadas ao longo das safras.

O desenvolvimento e a aplicação de métodos, técnicas e procedimentos permitem detectar, identificar, qualificar, cartografar, prever e monitorar os diversos aspectos e fatores que influenciam a dinâmica de atividades agrícolas, pecuárias, florestais e ambientais em nível local, regional e nacional.

Bons prognósticos e diagnósticos territoriais são fundamentais na busca pelo desenvolvimento agropecuário sustentável, de modo a equilibrar as

questões produtivas, socioeconômicas e ambientais. Além da caracterização de aspectos técnicos e agrônômicos, a análise detalhada da agropecuária de uma determinada região implica compreender como essas características interagem com cada situação natural, agrária, agrícola, de infraestrutura e socioeconômica possibilitando o monitoramento de sua evolução.

Goiás, no bioma Cerrado, tem abundância de água disponível e concentra áreas com agricultura irrigada. Em tempos de mudanças climáticas, monitorar o uso de água é de extrema valia para a conservação de recursos hídricos. Este estudo testou um modelo agrometeorológico espectral, índices de umidade, imagens de satélite e dados meteorológicos, para obter indicadores espectrais em larga escala, com a finalidade de detectar e mapear com eficiência áreas irrigadas. Esta publicação contribui para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) ODS 2, “Fome zero e agricultura sustentável”, ODS 6, “Água potável e saneamento”, ODS 12, “Consumo e produção responsáveis” e ODS 13 “Ação contra a Mudança global do clima”, da Organização das Nações Unidas (ONU).

Gustavo Spadotti Amaral Castro
Chefe-Geral da Embrapa Territorial

Sumário

Introdução	9
Métodos aplicados	10
Discussão	12
Considerações finais	17
Referências	17

Introdução

A escassez de recursos hídricos em todo o mundo tornou-se mais prevalente devido ao rápido crescimento populacional em regiões com limitação de água e ao impacto das mudanças climáticas na frequência e gravidade da seca. A agricultura irrigada desempenha papel significativo no uso da água, e utiliza até 70% dos recursos de água doce para irrigar 25% das culturas mundiais (FAO, 2020).

Nos últimos anos, a expansão de áreas irrigadas no Brasil foi da ordem de 200 mil hectares ao ano, principalmente pivôs centrais. As taxas médias de crescimento da área irrigada oscilaram entre 4,4% e 7,3% ao ano: em 1960, o Brasil apresentava 462 mil hectares equipados para irrigação; em 1970, mais de 1 milhão de hectares; em 1990, mais de 3 milhões de hectares; e, em 2016, mais de 7 milhões de hectares (Agência Nacional de Águas, 2021). Em tempos de escassez hídrica, mapear as áreas irrigadas tem fundamental importância para a conservação de recursos hídricos.

Cerca de 60% das áreas irrigadas do Brasil e 80% dos pivôs centrais concentram-se no bioma Cerrado (Althoff; Rodrigues, 2019). Considerado um crescimento médio de 56 mil hectares por ano, estima-se que a área irrigada possa atingir até 3 milhões de hectares em 2050 e impactar a dinâmica de uso de água na região. A tendência de escassez de recursos hídricos, em contraponto à sua demanda crescente, causa sérios conflitos sobre o uso da água.

A maioria dos estudos baseados em imagens de satélite que envolvem monitoramento de produção agrícola e consumo de água em sistemas de pivôs centrais está relacionada com a delimitação visual de áreas ocupadas por esse sistema de irrigação. Diante disso, ferramentas para mapeamento de áreas irrigadas que usam imagens de satélites e dados meteorológicos, como índices espectrais e modelos agrometeorológicos, destacam-se por sua importância. Neste estudo, o índice de umidade *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) foi utilizado para monitorar a umidade dos cultivos e determinar as áreas agrícolas com estresse hídrico, detectar a umidade do solo e a saúde da vegetação

(Jin; Sader, 2005), (Arachchi; Mohanty, 2024). Também foi utilizado o modelo agrometeorológico espectral *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (Safer) (Teixeira, 2010), desenvolvido e validado usando dados de experimentos de campo e imagens de satélite envolvendo vegetação natural e culturas irrigadas.

O monitoramento da evapotranspiração (ET) por sensoriamento remoto nas lavouras de irrigação é uma ferramenta importante para aplicações como gerenciamento agrícola, monitoramento de recursos hídricos, análise de produtividade da água, estimativas de biomassa e produção agrícola. O modelo proposto para estimar a biomassa (BIO) com base na radiação solar global (RG) e no desenvolvimento de coberturas de plantas tem precisão aceitável e pode ser usado remotamente com qualquer satélite em diferentes ecossistemas (Bastiaanssen, 2005). Embora vários estudos tenham sido feitos em larga escala, ainda são necessárias pesquisas sobre o uso de modelos para a combinação de ET e BIO, especialmente para aplicações que operam em diferentes superfícies com condições de escassez de água e uso racional dos recursos hídricos.

Neste estudo foi analisado o município de Cristalina, no estado de Goiás, bioma Cerrado, por apresentar grande concentração de áreas com agricultura irrigada e abundância de água disponível na região, pois, em tempos de mudanças climáticas, monitorar o uso de água é de extrema valia para a conservação de recursos hídricos.

O objetivo da pesquisa foi testar métodos para detecção de áreas irrigadas em larga escala através de imagens de satélite, análise dos indicadores espectrais e modelagem agrometeorológica, com a finalidade de mapear as áreas irrigadas, métodos esses que possam ser implementados para acompanhamento de pivôs centrais em atividade, visando a conservação de recursos hídricos.

Este trabalho está associado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) da Organização das Nações Unidas (ONU) ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 6 (Água potável e saneamento), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança global do clima).

Métodos aplicados

A área de estudo compreende o município de Cristalina, Goiás (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima é caracterizado como Aw, tropical de savana com inverno seco (Köppen, 1936).

Foram utilizados dados meteorológicos diários de radiação solar global (RG), temperatura do ar (Ta), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (v) da estação meteorológica de Cristalina, GO, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), do ano de 2023.

Para estimar os parâmetros, o processamento foi feito no Google Earth Engine (GEE), em cuja plataforma são disponibilizadas pela Copernicus imagens do sensor Sentinel-2A, produto MSI, Level 2A, corrigidas atmosféricamente. As imagens selecionadas do Sentinel-2A (resolução espacial de 10 m), são referentes ao ano de 2023, e foram usadas as bandas do visível (VIS), infravermelho de onda curta (SWIR) e infravermelho próximo (NIR).

Foi obtido o índice *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) (Arachchi; Mohanty, 2024), conforme a Equação 1:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

NIR, do inglês *near infrared reflectance*, refere-se à refletância na banda do infravermelho próximo (banda 8), e SWIR, do inglês *shortwave infrared*, refere-se à refletância na banda do infravermelho de onda curta (banda 11).

Os valores de NDMI de todas as imagens foram somados para a agregação anual, que fornece uma representação consolidada da umidade do solo ao longo de 2023. Posteriormente, foram testados limiares de NDMI, para detectar áreas úmidas com maior exatidão, com limite estabelecido de -0,05. O NDMI varia de -1 a 1. Valores negativos indicam baixa umidade e valores positivos indicam de média a alta umidade.

Para a modelagem agrometeorológica espectral (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*, Safer), o albedo da superfície (α_0) foi calculado segundo a Equação 2:

$$\alpha_0 = a \cdot \alpha_2 + b \cdot \alpha_3 + c \cdot \alpha_4 + d \cdot \alpha_8 \quad (2)$$

α_2 , α_3 , α_4 e α_8 são as refletâncias nas faixas espectrais das bandas 2, 3, 4 e 8 do sensor Sentinel-2A, e a, b, c e d são coeficientes de regressão que

apresentam, respectivamente, os valores de 0,32, 0,26, 0,25 e 0,17.

Para a temperatura da superfície (T_s), foi aplicada a Equação 3, do balanço de radiação (Teixeira, 2010):

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{RG - \alpha_0 \cdot RG + \varepsilon_A \cdot \delta \cdot T_a^4 - R_n}{\varepsilon_s \cdot \delta}} \quad (3)$$

RG e Ta são, respectivamente, os valores diários da radiação solar incidente e da temperatura média do ar nas estações agrometeorológicas, Rn é a radiação líquida diária, ε_s e ε_A são, respectivamente, as emissividades atmosférica e de superfície, e δ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$). ε_s e ε_A são calculados segundo as Equações 4 e 5 (Teixeira, 2010):

$$\varepsilon_s = a_s \cdot \ln NDVI + b_s \quad (4)$$

$$\varepsilon_A = a_A + (\ln \delta_s)^{b_A} \quad (5)$$

δ_s é a transmissividade de ondas curtas calculada como a razão de RG para a radiação solar incidente no topo da atmosfera, e a_s , b_s , a_A e b_A são coeficientes de regressão tomados como 0,06, 1,00, 0,94 e 0,10.

Rn diário pode ser descrito pelos valores de 24 h da radiação líquida de ondas curtas, com um termo de correção para a radiação líquida de ondas longas na mesma escala de tempo (Equação 6):

$$R_n = (1 - \alpha_0) R_G - a_1 T_{sw} \quad (6)$$

a_1 é o coeficiente de regressão da relação entre a radiação líquida de ondas longas e Tsw em escala diária.

Devido à influência térmica na radiação de ondas longas através da equação de Stefan-Boltzmann, um estudo anterior investigou se as variações do coeficiente a_1 da Equação 6 pode ser explicado por variações em 24 h Ta (Equação 7):

$$a_1 = d T_a - e \quad (7)$$

d e e são coeficientes de regressão, 6,99 e 39,93, respectivamente. O algoritmo Safer é usado para modelar os valores instantâneos da relação ET/ET_0 , que é, então, multiplicada pelo ET da estação meteorológica, para estimar os valores diários de larga escala do ET (Equação 8):

$$\frac{ET}{ET_0} = \left\{ \exp \left[f + g \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

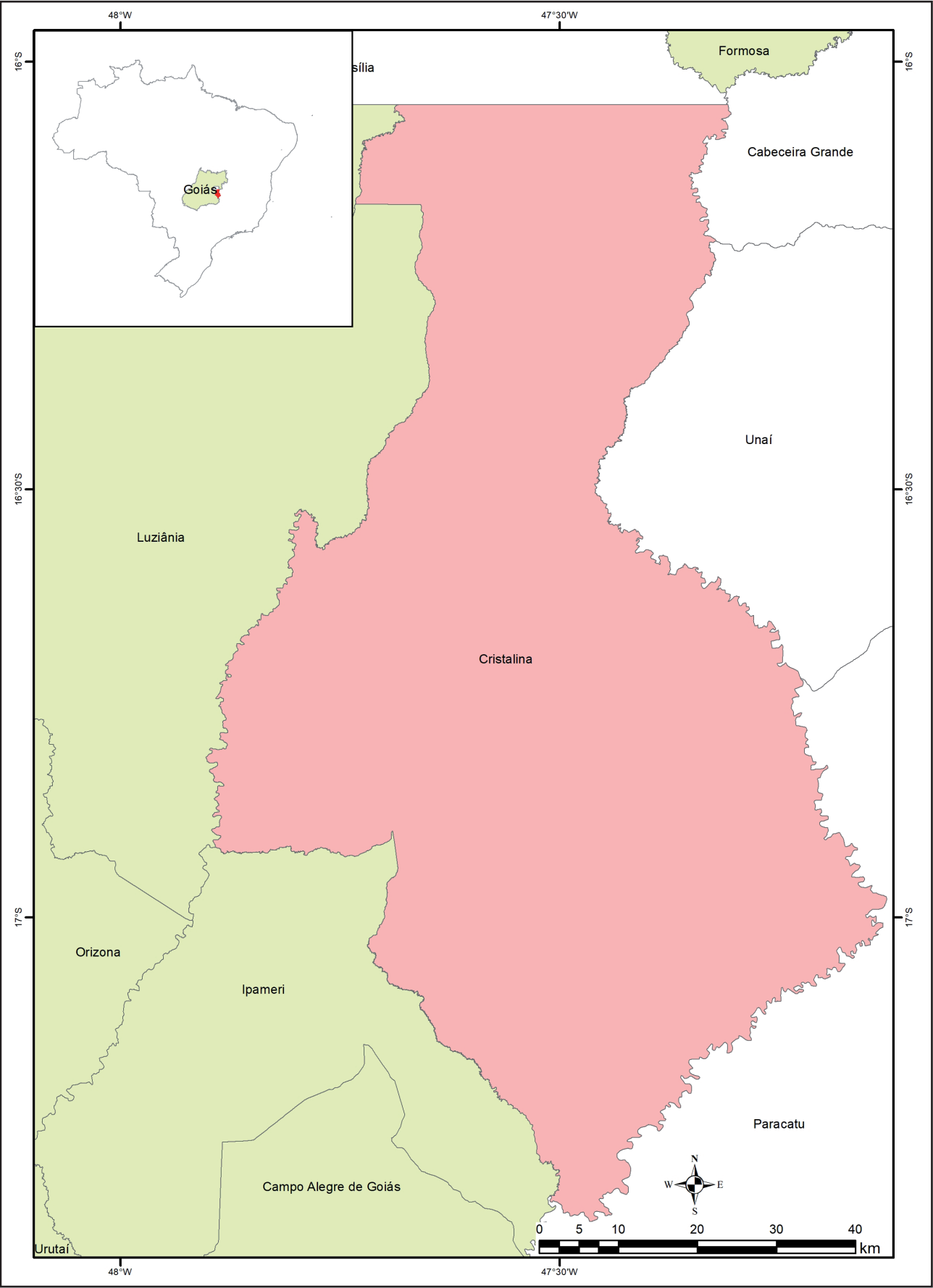


Figura 1. Área de estudo, município de Cristalina, estado de Goiás, Brasil.

ET_0 é o mapa da evapotranspiração de referência de estação meteorológica calculado pelo método de Penman-Monteith e f e g são os coeficientes de regressão, 1,9 e 0,008, respectivamente.

A fração evaporativa (E_f) é incluída para levar em conta os efeitos da umidade do solo e é definida como o fluxo de calor latente (λE) dividido pela energia disponível, que, por sua vez, é a diferença entre R_n e o fluxo de calor do solo (G) (Equação 9):

$$E_f = \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (9)$$

λE é obtido transformando ET em unidades de energia, com todos os termos de energia considerados em MJ/m/d no algoritmo Safer.

Para obter os valores diários de G , foi utilizada a Equação 10:

$$\frac{G}{R_n} = a_g \exp(b_g \alpha_0) \quad (10)$$

a_g e b_g são coeficientes de regressão considerados 3,98 e -25,47, respectivamente.

Os valores diários de RG são utilizados para estimar a radiação fotossinteticamente ativa em grande escala (PAR) para a escala de tempo diária (Equação 11):

$$PAR = hRG \quad (11)$$

$h = 0,44$ é a constante da equação de regressão encontrada nas condições brasileiras e reflete a porção de RG que pode ser utilizada pela clorofila foliar para fotossíntese.

Os valores da radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($APAR$) são obtidos diretamente de PAR (Equação 12):

$$APAR = fPAR \cdot PAR \quad (12)$$

O fator $fPAR$ é estimado a partir dos valores do índice de vegetação por diferença normalizada ($NDVI$) (Teixeira, 2009) (Equação 13):

$$fPAR = iNDVI = j \quad (13)$$

Os coeficientes i e j , 1.257 e -0.161, respectivamente, foram relatados para uma mistura de tipos de culturas, e a BIO é quantificada usando a Equação 14:

$$BIO = \varepsilon_{max} \cdot E_f \cdot APAR \cdot 0,864 \quad (14)$$

ε_{max} é a eficiência máxima de uso da luz, que depende da vegetação e das espécies C3 ou C4, e 0,864 é um fator de conversão unitário.

A produtividade da água (PA) foi calculada a partir da Equação 15:

$$PA = \frac{BIO}{ET} \quad (15)$$

Foram feitos processamentos para todo o ano de 2023, e destacam-se as análises referentes a agosto, mês com maior déficit hídrico na região de estudo, conforme dados disponibilizados na plataforma Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (Sisdagro) (Inmet, 2024), referentes aos períodos de excesso e déficit hídrico.

Para o processamento das imagens, dos dados meteorológicos, assim como do algoritmo Safer e do NDMI, foram utilizadas a plataforma Google Earth Engine (GEE) e a linguagem de programação Python, no Google Colab, que permite integrar *scripts* à plataforma. Após o processamento no Code Editor do GEE, os dados analisados foram exportados para o ArcGIS, para elaboração das figuras.

Discussão

Foram feitos processamentos de todo o ano de 2023. Destacaram-se no estudo as análises referentes ao mês de agosto, devido ao fato de ser o mês com maior déficit hídrico na região, conforme dados referentes aos períodos de excesso e déficit hídrico do Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (Sisdagro) (Inmet, 2024).

Na Figura 2, observa-se o índice espectral *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) no município de Cristalina, GO. O NDMI varia de -1 a +1. Valores negativos indicam baixo teor de água na vegetação e valores mais altos (em azul) correspondem a elevado teor de água. Os valores elevados de NDMI referem-se às áreas de agricultura irrigada, predominantemente pivôs centrais. O índice NDMI, baseado nas bandas do infravermelho próximo e infravermelho médio, é altamente correlacionado com o conteúdo de água do dossel vegetal e consegue acompanhar melhor as mudanças na biomassa e nos estresses de umidade das plantas do que o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Arachchi; Mohanty, 2024). Fernandes Filho et al. (2023) usaram a combinação entre os índices NDMI e *Neighborhood Green Chlorophyll Vegetation Index* (NGCVI), a partir de imagens Sentinel-2, para

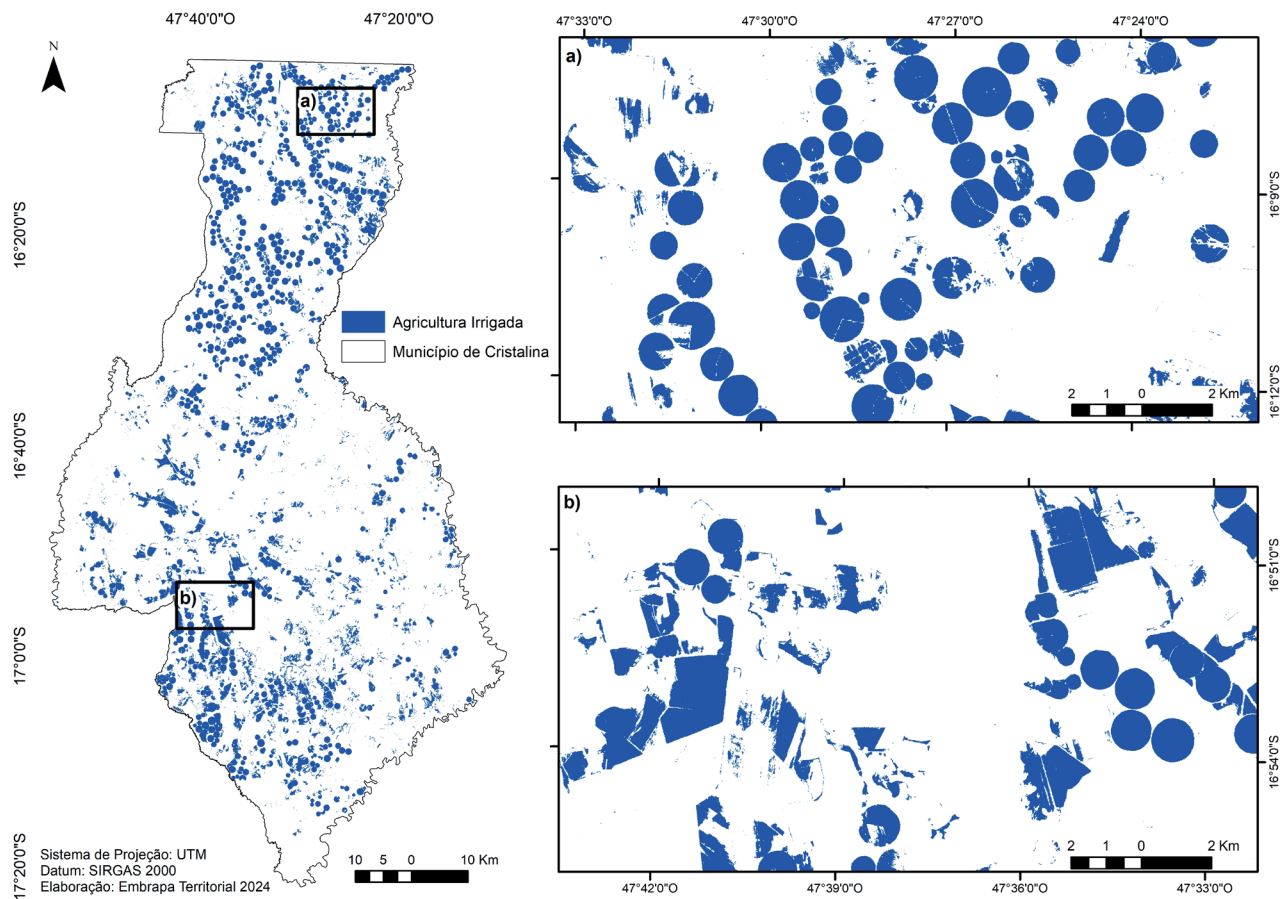


Figura 2. Áreas de agricultura irrigada para o município de Cristalina, GO.

mapear áreas de agricultura irrigada usando o classificador *Random Forest*. Os autores observaram que os índices permitem inferir sobre regiões onde há agricultura irrigada, entretanto não podem ser empregados isoladamente, corroborando este estudo, que os analisa em conjunto com a modelagem agrometeorológica espectral, para mapear áreas irrigadas.

Através da aplicação do modelo *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (Safer), usando imagens Sentinel-2A e dados meteorológicos, foram obtidos indicadores biofísicos como evapotranspiração diária (ET), biomassa (BIO) e produtividade da água (PA) (Figuras 3, 4 e 5) respectivamente, no município de Cristalina, GO, referentes a agosto de 2023, período com elevado déficit hídrico. Devido à ausência de nuvens e aos baixos índices pluviométricos, as áreas irrigadas destacam-se na imagem, com maiores valores de BIO, ET e PA. Com isso, infere-se que o alto vigor vegetativo nas áreas agrícolas em período seco deve-se ao fator irrigação, principalmente por pivôs centrais.

Com base na análise dos resultados, a ET média em todo o município foi de $0,92 \pm 0,73$ mm.

Nas áreas irrigadas por pivôs centrais, foram observados valores de ET maiores que 3 mm, e valores médios de 3,35 mm. Rodrigues (2024) calculou as médias mensais de ET para todo o Cerrado, tendo observado que o período de maior demanda hídrica ocorre de agosto a novembro, em especial no leste e no norte do bioma. Em estudo feito usando o modelo Sebal para estimar evapotranspiração e outros parâmetros biofísicos (Andrade et al., 2014), foram obtidos valores de ET diária média de 2,4 mm/dia em savana estépica/chaco. Nas áreas que se estendem pelas classes savana (cerrado), pecuária (pastagem plantada) e áreas antropizadas, a ET diária variou de 1,3 a 1,9 mm/dia. Sanches et al. (2016) observaram valores médios e ET de 2,5 mm/dia na estação seca e de 4,1 mm/dia na chuvosa.

Em áreas irrigadas, BIO alcançou 135,7 kg/ha/dia em áreas de pivôs centrais, em destaque na imagem em relação aos demais alvos da superfície (Figura 4). É importante salientar que as culturas são fortemente sensíveis à distribuição espacial do teor de água do solo (Claverie et al., 2012), e os valores de BIO das culturas irrigadas também são influenciados por diferentes níveis de fertilização, fases da cultura e irrigação (Wu et al., 2010).

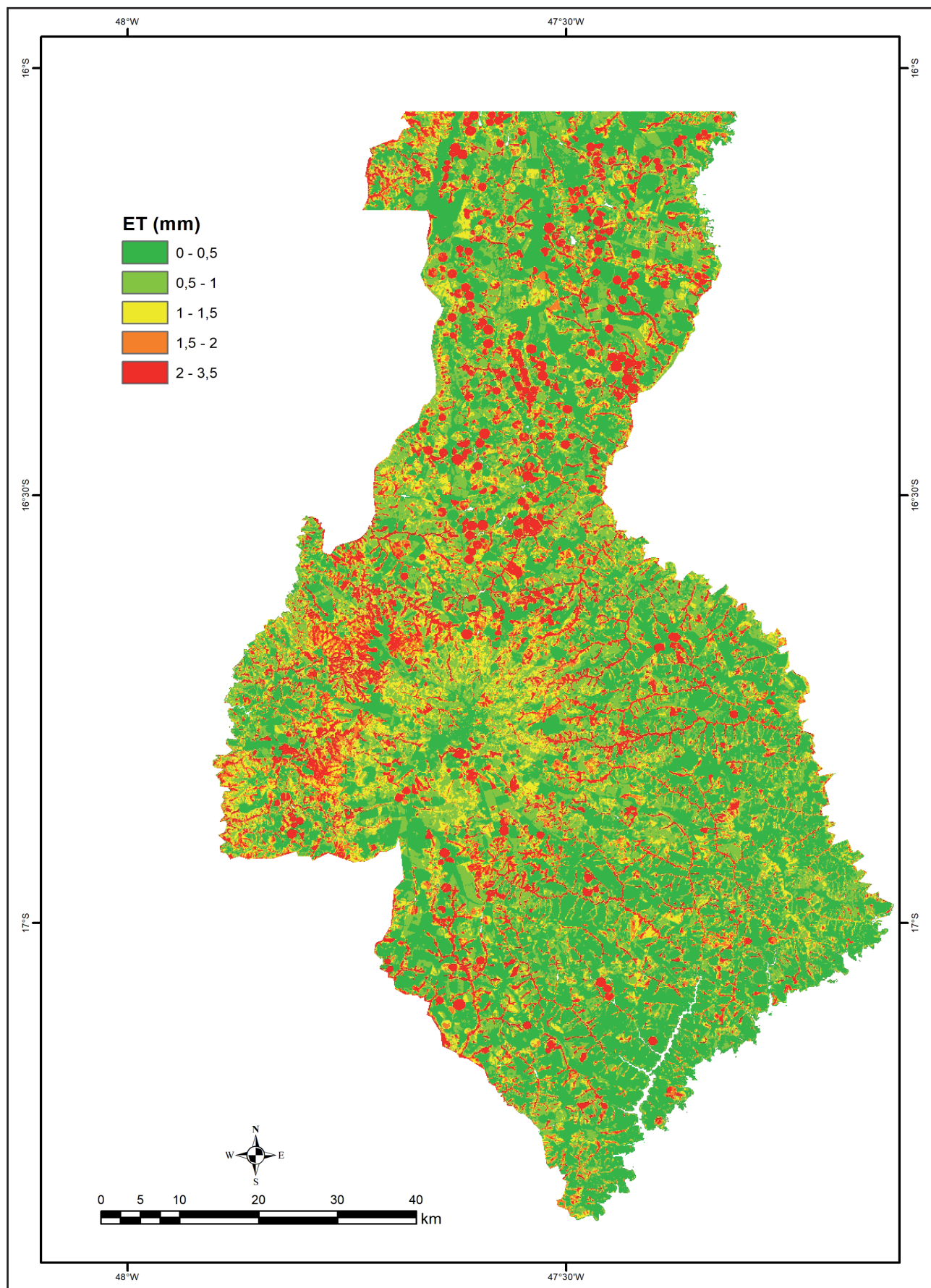


Figura 3. Evapotranspiração diária (mm) do município de Cristalina, GO, obtidas através do processamento da modelagem agrometeorológica.

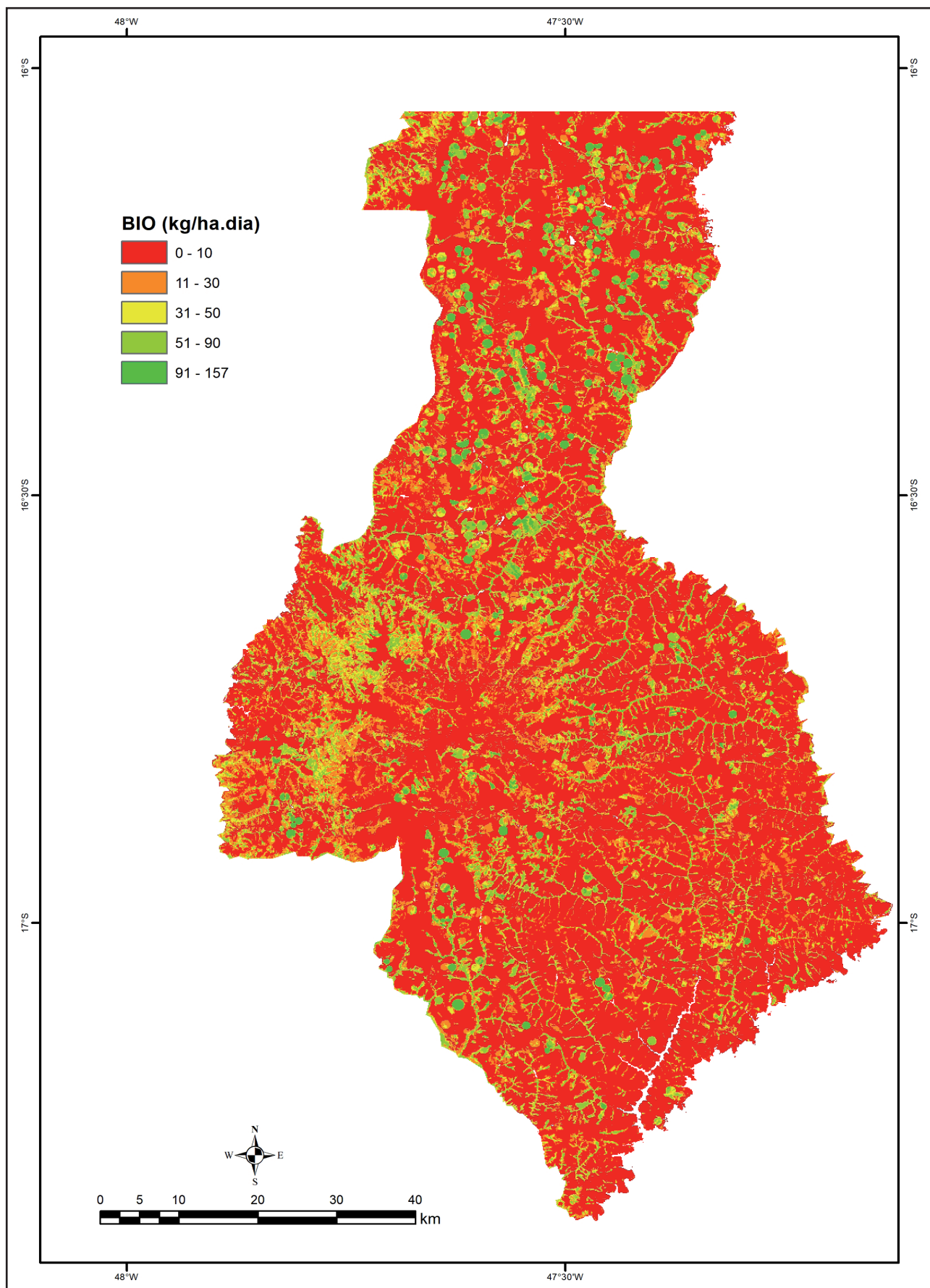


Figura 4. Biomassa (kg/ha/dia) do município de Cristalina, GO, obtida através do processamento da modelagem agrometeorológica.

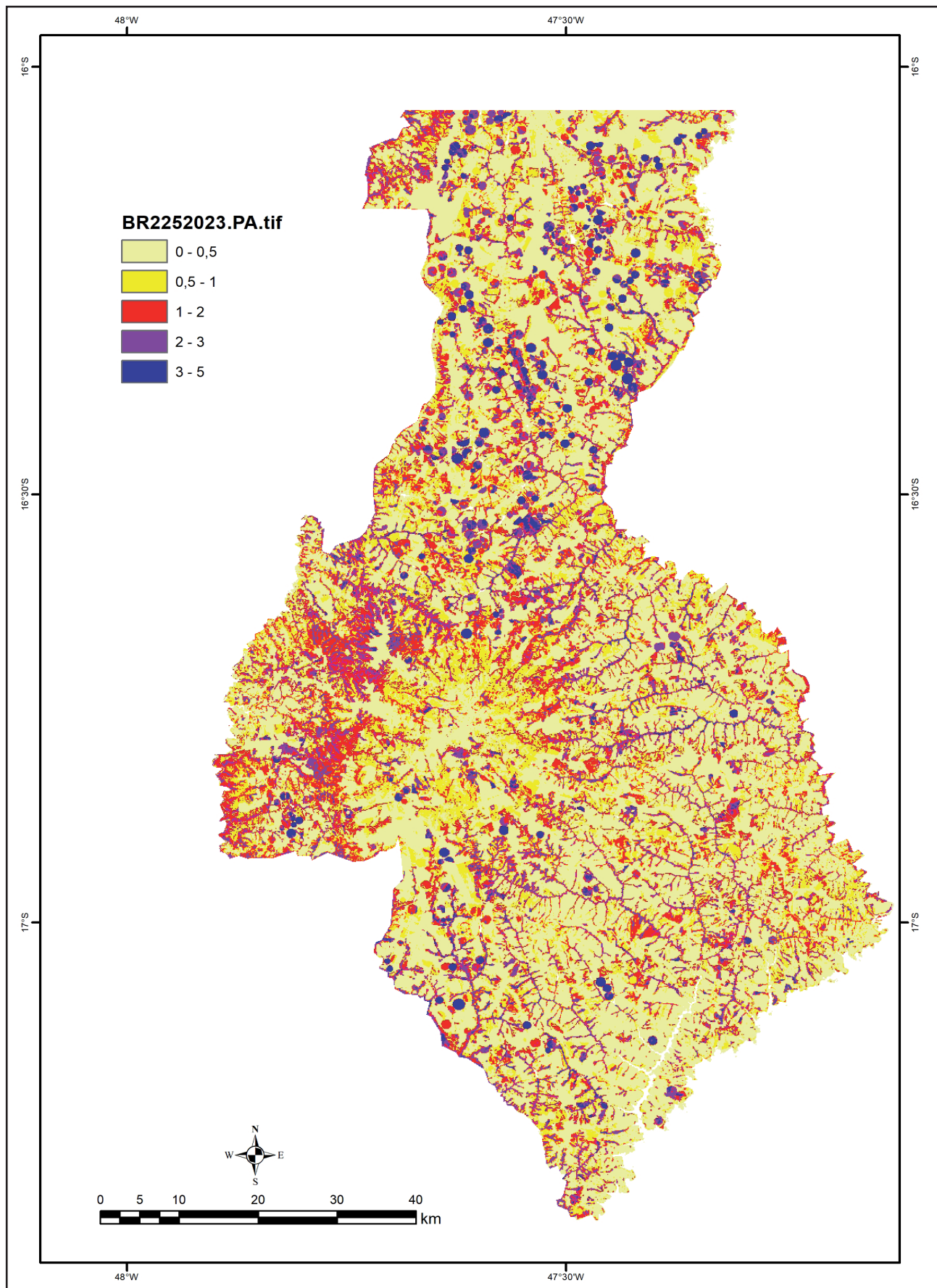


Figura 5. Produtividade da água (kg/m^3) do município de Cristalina, GO, obtida através do processamento da modelagem agrometeorológica.

Os valores de BIO estão de acordo com Arantes et al. (2015), que usaram o produto do Modis, MOD13Q1 *Enhanced Vegetation Index*, e observaram que o desenvolvimento máximo da vegetação do bioma Cerrado ocorre de janeiro a março, e cai para a metade de agosto a setembro. Santos et al. (2020) também usaram produtos do sensor Modis no Cerrado e constataram declínio nos valores de BIO nas espécies desse bioma após redução das chuvas, com valores inferiores a 40 kg/ha/dia no trimestre de julho a setembro. Nas áreas irrigadas, BIO ficou acima alcançou valores de 130 kg/ha/dia. Esses resultados justificam o destaque das áreas irrigadas nas imagens de agosto, com o maior desenvolvimento de BIO decorrente do fator irrigação, em período de elevado déficit hídrico. É importante salientar que, neste estudo, BIO é a produção de biomassa diária e não a biomassa atual, e pode acontecer de a vegetação mais alta apresentar menor taxa que a vegetação mais baixa.

Na Figura 5, as áreas de pivôs centrais apresentam produtividade da água (PA) superior a 3 kg/m³, e alcançam valor máximo de 4,5 kg/m³. Os resultados corroboram Teixeira (2009), que encontrou valores de PA em torno de 3,4 kg/m³ em áreas de frutíferas. Na região semiárida da Mongólia Interior, foram relatados valores de PA que variaram de 1,1 a 1,3 kg/m³ para aveia; 1,5 a 2,6 kg/m³ para girassol; 0,5 a 1,1 kg/m³ para leguminosas; e 3,1 a 4,4 kg/m³ para batata (Yuan et al., 2013). Para a cultura de oleaginosas nas condições de semiárido na Índia, a PA variou de 1,9 a 2,3 kg/m³ (Adak et al., 2013). Os resultados obtidos corroboram estudo feito usando análise multitemporal e imagens de menor resolução espacial do sensor Modis (250 m), em que foram analisadas as classes de uso e cobertura disponibilizadas no Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (Probio) (Brasil, 2016).

Em estudo feito no Cerrado, foram encontrados valores médios de PA de 2,3 kg/m³, no período de julho a setembro, corroborando que a irrigação é responsável por maior produtividade das culturas em períodos de deficiência hídrica na região (Teixeira et al., 2024).

As variáveis climáticas que mais afetam a ET são a temperatura do ar, a umidade do ar e a energia disponível. Entretanto, seus valores dependem também da abertura dos estômatos e da adaptação das espécies à escassez hídrica, o que é mais notável nos ecossistemas do bioma Cerrado (Almagro et al., 2017; Sano et al., 2019; Azevedo et al., 2020). Os resultados dos indicadores hídricos evidenciaram atraso entre os valores de evapotranspiração e balanço hídrico ao longo do ano, o que deve estar relacionado ao tempo requerido para a umidade na zona das raízes recuperar os bons níveis após as chuvas, mas também devido ao

fato de que alguma quantidade de água é perdida por escoamento superficial e percolação após as chuvas, o que afeta a BIO e, consequentemente, a PA.

Apesar de as análises terem sido feitas em um único ano, os resultados preliminares são animadores, diante da possibilidade de monitoramento das condições hídricas e respostas espectrais da superfície usando imagens com boa resolução espacial, como as do satélite Sentinel-2A. É importante salientar que os resultados estão em fase de validação com atividade de campo no município de Cristalina, GO, com a finalidade de verificar a acurácia dos métodos para poder extrapolar-los para grandes áreas do estado. Com isso, será possível mapear as áreas irrigadas e acompanhar os pivôs centrais em atividade, visando a conservação de recursos hídricos.

Considerações finais

A utilização de indicadores agrometeorológicos espectrais e índice de umidade mostrou-se eficiente na detecção das áreas irrigadas. O *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) foi considerado um bom índice na detecção das áreas úmidas em período de escassez hídrica – assim como os indicadores evapotranspiração (ET), biomassa (BIO) e produtividade da água (PA) –, e apresentou valores elevados, destacando-se em relação aos demais alvos, devido ao fator irrigação. A aplicação conjunta do algoritmo *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (Safer) com imagens de satélite de boa resolução espacial, como do Sentinel-2A, e dados meteorológicos mostrou-se viável, e possibilitou verificar a variabilidade espacial de indicadores como ET, BIO e PA em áreas irrigadas. Com a validação dos resultados em campo, a metodologia poderá ser ampliada para grandes áreas e utilizada para acompanhamento de pivôs centrais em atividade, visando a conservação de recursos hídricos.

Referências

- ADAK, T.; KUMAR, G.; CHAKRAVARTY, N. V. K.; KATIYAR, R. K.; DESHMUKH, P. S. Biomass and biomass water use efficiency in oilseed crop (*Brassica juncea* L.) under semi-arid microenvironments. *Biomass and Bioenergy*, v. 51, p. 154-162, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília, DF, 2021. 130 p.

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific Reports**, v. 7, 8130, 2017.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019.

ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. de C.; SANO, E. E.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; NOGUEIRA, S. F. Evapotranspiração em pastagens com indicadores de degradação na bacia hidrográfica do Alto Tocantins. In INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2., 2014, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Inovagri, 2014.

ARACHCHI, M. L. P.; MOHANTY, S. Agricultural drought monitoring in maligavila GN division based on normalized difference moisture index (NDMI) and vegetation health index (VHI). **Journal of Geosciences Insights**, v. 2, n. 2, p. 9-14, 2024.

ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66-78, 2015.

AZEVEDO, G. B. de; REZENDE, A. V.; AZEVEDO, G. T. O. S.; MIGUEL, E. P.; AQUINO, F. G.; BRUZINGA, J. S. C.; OLIVEIRA, L. S. C. de; PEREIRA, R. S.; TEODORO, P. E. Woody biomass accumulation in a Cerrado of Central Brazil monitored for 27 years after the implementation of silvicultural systems. **Forest Ecology and Management**, v. 455, 117718, 2020.

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL. Model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.

CLAVERIE, M.; DEMAREZ, V.; DUCHEMIN, B.; HAGOLLE, O.; DUCROT, D.; MARAISICRE, C.; DEJUOUX, J-F; HUC, M.; KERAVEC, P.; BÉZIAT, P.; FIEUZAL, R.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using spatial and temporal resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 884-857, 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mapas de cobertura vegetal dos biomas brasileiros**. 2016. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio>. Acesso em: 26 out. 2024.

FAO. **The state of food and agriculture 2021**. Overcoming water challenges in agriculture. Rome: FAO, 2020.

FERNANDES FILHO, A. S.; FONSECA, L. M. G.; BENDINI, H.; SANCHES, I. D. Avaliação de índice de vizinhança para mapeamento de agricultura irrigada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2023

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Sisdagro: balanço hídrico climatológico decenal**. 2024. Disponível em: <https://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/climatologia/bhclimatologiconormal/index>. Acesso em: 26 out. 2024.

JIN, S.; SADER, S. A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 3, p. 364-372, 2005.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (ed.). **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. p. 1-44. v. 1. (The Geographical System of Climates).

RODRIGUES, L. N. (ed.). **Agricultura irrigada no cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável**. 2. ed. rev. e amp. Brasília, DF: Embrapa, 2024.

SANCHES, F. M.; XIMENES, A. R.; CORADI, P. C.; ROQUE, C. G.; CUNHA, F. F. da. Estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte do Brasil. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 13, n. 2, 2016.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: a spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818-828, 2019.

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

TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C. **Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region**. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2009. 226 p.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; TAKEMURA, C. M.; SOUSA, I. F.; ALMEIDA, A. Q. Indicadores ambientais para o bioma cerrado analisados com

uso de geotecnologias. In: RODRIGUES, L. N. (ed.). **Agricultura irrigada no cerrado**: subsídios para o desenvolvimento sustentável. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, 2024.

WU, C.; MUNGER, J. W.; NIU, Z.; KUANGA, D. Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance

data in Havard Forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2925-2939, 2010.

YUAN, M.; ZHANG, L.; GOU, F.; SU, Z.; SPIERTZ, J. H. J.; WERF, W. VAN DER. Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in the semi-arid Inner Mongolia. **Agricultural Water Management**, v. 122, p. 28-38, 2013.

