

ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO SAFRINHA POR IMAGENS DE SATÉLITE LANDSAT 8

Wini da Rocha Clarindo¹, Rivanildo Dallacort², Vanessa Rakel de Moraes Dias³, Rafael Cesar Tieppo², Julia Gallo Barreto¹

¹ Acadêmicas do curso de Agronomia, Universidade do Estado de Mato Grosso-UNEMAT, Campus Professor Eugênio Carlos Stieler, Tangará da Serra-MT

² Professores Doutores do curso de Agronomia e do Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, UNEMAT, Tangará da Serra-MT.

³ Doutora em Física Ambiental, Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, UNEMAT, Tangará da Serra-MT.

E-mail: vanessadias@unemat.br

Recebido em: 15/05/2022 – Aprovado em: 15/06/2022 – Publicado em: 30/06/2022

DOI: 10.18677/EnciBio_2022B16

trabalho licenciado sob licença [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

RESUMO

As técnicas de Sensoriamento Remoto vêm sendo utilizadas de forma promissora para a estimativa da produção e produtividade das culturas e obtenção de parâmetros biofísicos de superfície. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar variáveis biofísicas, evapotranspiração, biomassa e produtividade do milho, por meio do algoritmo SEBAL e de imagens do satélite Landsat-8 de quatro datas da safra 2019. Com 57 e 73 dias após a semeadura, em 19 de abril e 05 de maio, respectivamente, os valores de NDVI confirmaram que o milho estava no ápice de sua biomassa, em pleno crescimento. E em 06 de junho o milho já estava em ponto de murcha permanente. A maior evapotranspiração foi em 19 de abril: 3,81mm dia⁻¹ (talhão A) e 3,79 mm dia⁻¹ (talhão B). O ápice da produção de biomassa estimada também foi nesta data, assim como as demais variáveis, com médias de 59% (talhão A) e 43% (talhão B) maiores quando comparadas com a última data avaliada no final do desenvolvimento da cultura. A produtividade avaliada em campo, obtida pelos maquinários agrícolas da propriedade, foi de 106 sacas por hectare ou 6360 kg ha⁻¹ para ambos os talhões. Isto indica que a produtividade potencial estimada por imagem de satélite foi maior em 18% e a produtividade real estimada foi subestimada em 12%.

PALAVRAS-CHAVE: Evapotranspiração; SEBAL; Sensoriamento Remoto.

PRODUCTIVITY ESTIMATION OF THE SECOND SEASON CORN CROP BY LANDSAT 8 SATELLITE IMAGES

ABSTRACT

The Remote Sensing techniques have been used in a promising way to estimate crop production and productivity and obtain surface biophysical parameters. In this context, the objective of this work was to estimate biophysical variables, evapotranspiration, biomass and corn productivity, using the SEBAL algorithm and Landsat-8 satellite images of four days of the 2019 harvest. Within 57 and 73 days

after seeding, on April 19 and May 5, respectively, the NDVI values confirmed that corn was at the peak of its biomass, in full growth. And on June 6th, the corn was already at the point of permanent wilting. The highest evapotranspiration was on April 19: 3.81mm day⁻¹ (field A) and 3.79mm day⁻¹ (field B). The peak of estimated biomass production was also on this date, as were the other variables, with averages of 59% (plot A) and 43% (plot B) higher when compared to the last date evaluated at the end of the crop development. The productivity evaluated in the field, obtained by the agricultural machinery of the property, was 106 bags per hectare or 6360 kg ha⁻¹ for both plots. This indicates that the potential productivity estimated by satellite image was higher by 18% and the estimated real productivity was underestimated by 12%.

KEYWORDS: Evapotranspiration; Remote sensing; SEBAL.

INTRODUÇÃO

A produção do milho está presente em quase todos os continentes, já que suas diversas formas de utilização elevam sua importância econômica, que vão desde a alimentação humana e animal até à indústria de alta tecnologia, como a produção de filmes e embalagens biodegradáveis (LUCENA *et al.*, 2017; MACHADO *et al.*, 2020). Segundo o IBGE (2019), o milho é uma das principais fontes de alimento para a população brasileira.

No Brasil, são produzidas duas safras, a primeira safra, que ocorre no verão, e a segunda safra, conhecida popularmente como safrinha, que ocorre na época da seca (ROCHA *et al.*, 2019). Na safra de 2018/2019, a produção de milho chegou a 100 milhões de toneladas, com uma exportação recorde, chegando a 35 milhões de toneladas. Em um ano houve um aumento de 23,9% na produção brasileira. A produtividade média ficou em 5.400 quilos de milho por hectare, 1,5% acima do ano anterior (CONAB, 2019).

O crescimento da demanda mundial por alimentos e a necessidade de aumento da produtividade na agricultura, têm alavancado os preços desta commodity, consequentemente, proporcionando boa lucratividade ao produtor e assim permitindo investimentos em tecnologia (LOPES *et al.*, 2021).

Diante do evidente crescimento populacional e o aumento no custo da produção agrícola, torna-se essencial a busca por atividades sustentáveis que garantam uma produtividade maior, de baixo custo, melhor qualidade e sem a necessidade de intervenção de novas áreas. E a tecnologia tem um papel fundamental no aumento da produtividade observada nos últimos anos. Esse novo ambiente digital pode auxiliar o agricultor a produzir mais e de forma mais sustentável (CUSTÓDIO, 2020).

A produtividade é um importante indicador econômico para a análise comparativa das perspectivas e do desempenho da empresa. Apesar da produtividade elevada por si só não poder representar genuinamente a situação da empresa e nem mesmo ser sinônimo de eficiência (RODRIGUES *et al.*, 2018), ela pode ser visada para que se obtenha uma lucratividade significativa.

No entanto, as informações sobre produção e produtividade de uma lavoura são relevantes não somente para a lucratividade, mas também para o agricultor no processo de tomadas de decisão, como logística, armazenamento e escoamento da produção. Assim, o investimento em técnicas de monitoramento de lavouras por meio do geoprocessamento e sensoriamento remoto foi se tornando mais atraente e acessível.

Nos últimos anos as técnicas de sensoriamento remoto, juntamente com algoritmos, vêm sendo utilizados de forma promissora, para a predição da produção e produtividade das culturas e obtenção de parâmetros biofísicos de superfície (BERTOLIN *et al.*, 2017). Além disso, essas técnicas podem ser usadas para avaliação do efeito de fertilizantes e adubos em uma lavoura, manejo de plantas daninhas (BORGES *et al.*, 2020) controle de pragas, monitoramento da quantidade e do desenvolvimento de biomassa (GUERINI FILHO; KUPLICH, 2019), previsão de safra (FRANÇA *et al.*, 2021), indicação da disponibilidade de terras que possam ser utilizadas para fins de produção agrícola (VEIGA *et al.*, 2020), e mensuração da expansão de culturas agrícolas.

O sensoriamento remoto é também utilizado no monitoramento das mudanças de uso e cobertura do solo provenientes da expansão da agricultura (BERTOLIN *et al.*, 2017; FERREIRA *et al.*, 2021), assim como a contribuição para as mudanças climáticas e impactos ambientais (FIGUEIREDO *et al.*, 2020), além da quantificação das fontes ou do sequestro de carbono (MORAIS *et al.*, 2017), entre outros estudos aplicados.

Neste contexto, o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) estima variáveis biofísicas que são úteis para a estimativa de produtividade, pois ele tem a vantagem de obtenção de parâmetros a partir de imagens de satélite e poucos dados observacionais (BASTIAANSSEN, 2000; BASTIAANSSEN; ALI, 2003).

Sua ampla utilização, aplicada em vários países, é referente ao fato de que este algoritmo requer somente imagens digitais de sensores orbitais e poucos dados de superfície que possibilitem determinar a radiância, a reflectância, o albedo, a temperatura da superfície, índices de vegetação, o fluxo de calor no solo, fluxos de calor latente e sensível, o balanço de energia, a evapotranspiração, caso dos sensores dos satélites da série Landsat, MODIS-Terra, AVHRR-NOAA, ASTER-Terra (ALLEN *et al.*, 2002; TASUMI *et al.* 2008).

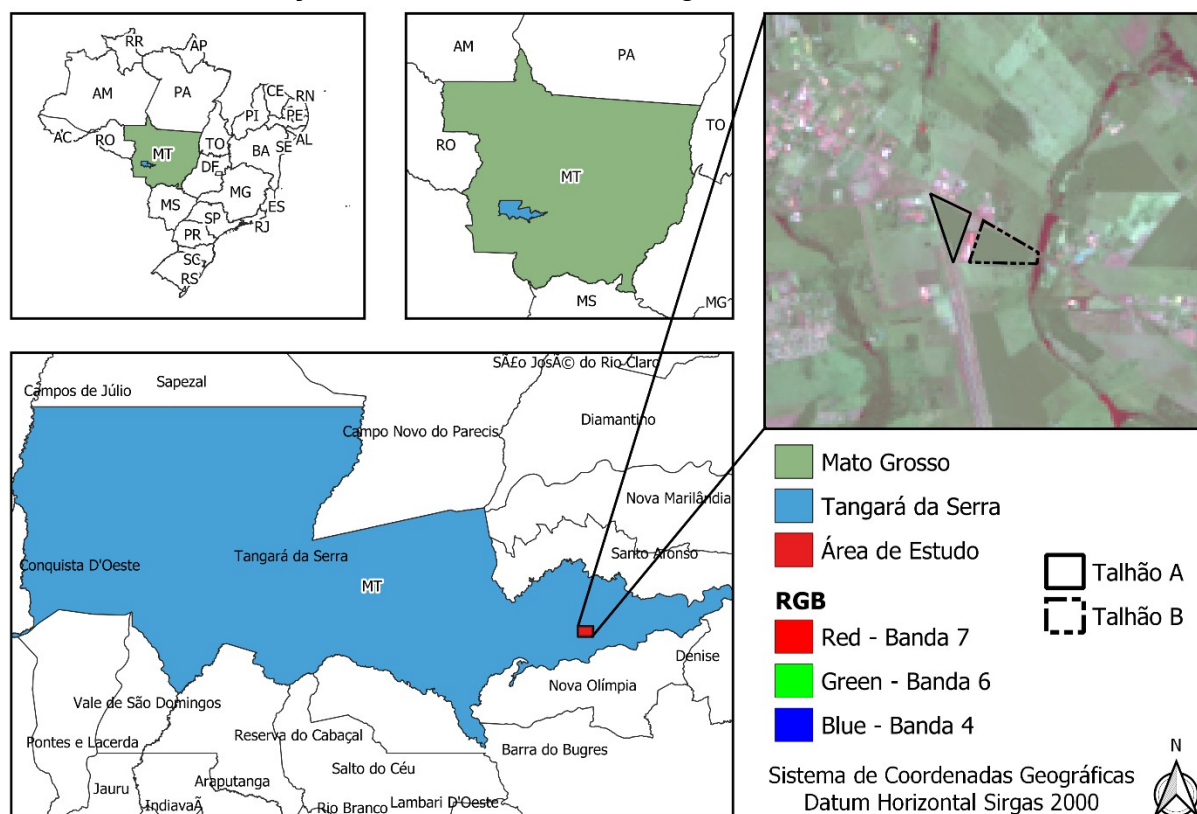
Numa sequência de modelagem aplicando-se o algoritmo SEBAL, estima-se ao final os valores de evapotranspiração real diária de maneira satisfatória. Além de apresentar-se como uma ferramenta de baixo custo e eficiente na geração de informações relevantes, pode servir para adequada gestão de recursos hídricos e contribuir para a diminuição dos riscos ligados à produção agrícola.

Assim, o objetivo deste trabalho foi estimar variáveis biofísicas, a evapotranspiração, a biomassa e a produtividade do milho segunda safra, por meio do algoritmo SEBAL e de imagens do satélite Landsat-8 de quatro datas da safra de 2019.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Tangará da Serra-MT, nas coordenadas geográficas 15° 21' 0" S, 58° 33' 24" O e elevação de 440 metros. Foram avaliados dois talhões, Talhão A e Talhão B, de uma propriedade próxima à Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT (Figura 1). A semeadura ocorreu no dia 22 de fevereiro de 2019 e a colheita no dia 10 de junho de 2019, período considerado como safrinha, ou seja, milho semeado na segunda safra, logo após o cultivo da soja, e em sequeiro (ROCHA *et al.*, 2019).

FIGURA 1. Localização da área de estudo, Tangará da Serra – MT.



Fonte: Os autores (2021).

Segundo Dallacort *et al.* (2011), a região apresenta uma estação seca, que compreende os meses de maio a setembro, e uma chuvosa, entre outubro a abril, com precipitação média anual de 1.830 mm. Os valores médios anuais de temperatura e umidade relativa do ar são de 24,4°C e 70 - 80%, respectivamente (DALLACORT *et al.*, 2010). De acordo com Koppen, o clima é classificado como AW (tropical úmido megatérmico) e o solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (EMBRAPA, 2006).

As imagens do satélite Landsat-8 foram obtidas no endereço eletrônico: <http://earthexplorer.usgs.gov/> e adquiridas para a órbita-ponto 227-70, no formato GEOTIFF, para as seguintes datas: dia sequencial do ano (DSA) 109 (19/04/2019), 125 (05/05/2019), 141 (21/05/2019) e 157 (06/06/2019). O critério para seleção das imagens foi aquele que apresentasse a mínima presença de nuvens. Foram utilizadas as bandas 2 a 7 do sensor OLI e a banda 10 do sensor TIRS, do satélite Landsat-8.

Para o processamento das imagens utilizou-se a ferramenta Model Maker do software Erdas Imagine® versão 9.2 e para a elaboração final dos layouts dos mapas e cartas foi utilizado o software livre Qgis versão 2.18.0 (QGIS Development Team, 2019).

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir da estação meteorológica do Centro Tecnológico de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto aplicado à produção de Biodiesel (CETEGEO-SR), localizada no campo experimental da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, campus de Tangará da Serra.

Na tabela 1 estão apresentados os dados meteorológicos utilizados como entrada para o SEBAL no momento da passagem do satélite. A obtenção da temperatura (°C) e umidade relativa (%) na estação é feita pelo sensor CS215, a radiação solar (MJ m⁻²) pelo piranômetro CMP3, a velocidade do vento a 10 m (m s⁻¹) pelo anemômetro 03002-R.M.

TABELA 1. Data, horário, elevação solar (E), adquiridos nos metadados das imagens de satélite, radiação solar instantânea (Rs_{inst}), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (VV) no momento da passagem do satélite, registrados pela estação meteorológica da UNEMAT.

Data	Horário Local	E (°)	Rs _{inst} (W m ⁻²)	T (°C)	UR (%)	VV (m s ⁻¹)
19/04/2019	10:00:00	51.504	771,4	29,98	74,27	2,32
05/05/2019	10:00:00	48.429	721,1	28,76	75,51	3,08
21/05/2019	10:00:00	45.572	707,3	28,13	71,72	2,77
06/06/2019	10:00:00	43.405	639,7	26,55	72,75	1,96

Processamento das Imagens de Satélite

A aplicação do algoritmo SEBAL consiste na estimativa do fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G) e fluxo de calor latente (LE). O saldo de radiação (Rn) é calculado considerando-se a radiância e a reflectância de cada pixel da imagem de satélite, que varia espacialmente. O fechamento do balanço de energia pixel a pixel é processado considerando-se o fluxo de calor latente (LE) como um resíduo da equação do balanço de energia, dado pela Equação 1:

$$LE = Rn - H - G \quad (1)$$

em que LE, Rn, H e G são em W m⁻².

O saldo de radiação (Rn) foi estimado pela Equação 2, sugerida por Allen *et al.* (2002):

$$Rn = R_{s\downarrow} - \alpha_{sup} \times R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_o) \times R_{L\downarrow} \quad (2)$$

em que R_{s↓} é a radiação de onda curta incidente (W m⁻²), R_{L↓} é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície (W m⁻²), R_{L↑} é a radiação de onda longa emitida na direção da atmosfera (W m⁻²), ε_o é a emissividade da superfície (adimensional) e α_{sup} é o albedo da superfície (adimensional, varia de 0 a 1).

Após a estimativa do Rn, foi calculado o fluxo de calor no solo (G, em W m⁻²) segundo Bastiaanssen (2000), dada pela Equação 3:

$$G = \left[\frac{T_{sup}}{\alpha_{sup}} \times (0,0038 \times \alpha_{sup} + 0,0074 \times \alpha_{sup}^2)(1 - 0,98 \times NDVI^4) \right] \times Rn \quad (3)$$

em que T_{sup} é a temperatura da superfície (°C), NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada (adimensional, varia de -1 a 1).

Depois de obtido o fluxo de calor no solo, foi iniciado uma série de passos necessários para adquirir os valores de fluxo de calor sensível (H), sendo aplicadas as equações sugeridas por Allen *et al.* (2002) para que fosse possível obter o parâmetro de rugosidade inicial (z_{om} inicial), a velocidade de fricção inicial (u* inicial),

a velocidade do vento a uma altura (z) de 100 m (altura de mistura), e a resistência aerodinâmica inicial (r_{ah} inicial).

O SEBAL utiliza dois pixels chamados de “quente” e “frio” que foram selecionados na área de estudo, denominados “pixels âncoras”, para fixar condições limite para o balanço de energia. O pixel “frio” é selecionado em uma área com vegetação cobrindo totalmente o solo e, geralmente, úmida ou irrigada. Assim, assume-se valor zero para o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente máximo foi estimado por meio da Equação 4:

$$LE_{frio} = Rn - G \quad (4)$$

O pixel “quente” é selecionado onde houver solo exposto ou sem vegetação, onde considera-se valor zero para o fluxo de calor latente (LE). Assim, o fluxo de calor sensível máximo foi estimado pela Equação 5:

$$H_{quente} = Rn - G = \frac{\rho \times c_p \times (a + b \times T_s)}{r_{ah}} \quad (5)$$

em que a e b são parâmetros de ajuste, ρ é a densidade do ar úmido (kg m^{-3}), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1.004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), r_{ah} é a resistência aerodinâmica, T_s é a temperatura da superfície em Kelvin (K).

Utilizando-se os pixels âncoras foram obtidos os coeficientes de correlação a e b para obtenção de dT em cada pixel da imagem e, posteriormente, o fluxo de calor sensível inicial (H inicial). A próxima etapa foi um processo iterativo iniciando com a condição de estabilidade atmosférica, e realizando correções nos valores de H.

Posteriormente, estimou-se a velocidade de fricção (u^*), considerando a condição atmosférica, e, em seguida, o valor corrigido de r_{ah} . Por fim, obteve-se o fluxo de calor latente (LE) como um resíduo da equação clássica do balanço de energia. Com as componentes do balanço de energia, estimou-se a fração evaporativa, dada pela Equação 6:

$$\lambda = \frac{LE}{LE + H} = \frac{LE}{Rn - G} \quad (6)$$

A fração evaporativa foi utilizada para a estimativa da biomassa vegetal (BASTIAANSEN; ALI, 2003), iniciando pela estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (PAR, em W m^{-2}), Equação 7, radiação interceptada (FPAR, em W m^{-2}), Equação 8, e absorvida (APAR, em W m^{-2}) pelo dossel das plantas, Equação 9:

$$PAR = 0,48 \times K_{diário}^1 \quad (7)$$

$$FPAR = -0,161 + 1,257 \times NDVI \quad (8)$$

$$APAR = FPAR \times PAR \quad (9)$$

A próxima etapa foi calcular a eficiência do uso da radiação (ϵ_f) pela expressão descrita na Equação 10:

$$\epsilon_f = \epsilon_f^* \times T_1 \times T_2 \times \lambda \quad (10)$$

em que ε_f^* é o valor médio da máxima eficiência do uso da radiação, igual a 2,5 g MJ⁻¹ (BASTIAANSEN; ALI, 2003; TEIXEIRA *et al.*, 2012); λ é a fração evaporativa (adimensional); e T_1 e T_2 são escalares de temperatura obtidos por meio da aplicação das expressões apresentadas nas Equações 11 e 12:

$$T_1 = 0,8 + 0,02 \times T_{otima} - 0,0005 \times T_{otima}^2 \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp\{0,2 \times (T_{otima} - 10 - T_{mensal})\}} \times \frac{1}{1 + \exp\{0,3 \times (-T_{otima} - 10 - T_{mensal})\}} \quad (12)$$

em que T_1 é o fator que descreve os efeitos que surgem por causa do ar frio; T_2 é um fator de redução da eficiência do uso da radiação decorrente do ar quente; T_{otima} é a média da temperatura do ar (°C) durante o mês de máximo índice de área foliar ou NDVI; T_{mensal} é a média mensal da temperatura do ar (°C).

Com a determinação de ε_f , foi obtido biomassa vegetal acima do solo por meio do modelo apresentado na Equação 13 (BASTIAANSEN; ALI, 2003):

$$Bio = \varepsilon_f \times 0,864 \times \sum(APAR(t)) \quad (13)$$

em que Bio é a biomassa vegetal no período t correspondente ao ciclo da cultura, ou seja, o tempo referente entre a emergência e a colheita do milho. Na equação acima, foi utilizado o valor de 0,864 para a transformação de unidades e a obtenção da biomassa vegetal em kg ha⁻¹ (TEIXEIRA *et al.*, 2012).

Assim, ao estimar a biomassa vegetal foi possível obter a produtividade da cultura do milho por meio da Equação 14:

$$Produtividade_{estimada} = Y_{c\ pixel} \times NDVI_{pixel} \quad (14)$$

em que $Produtividade_{estimada}$ é a produtividade estimada pelo modelo (kg ha⁻¹), $Y_{c\ pixel}$ é a produtividade potencial da cultura em cada pixel da imagem (kg ha⁻¹) e $NDVI_{pixel}$ é o NDVI de cada pixel da cultura imageada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis biofísicas estimadas tiveram variação conforme o desenvolvimento do milho, o que ocorreu também com o NDVI, com menores índices no final do ciclo (Tabela 2).

TABELA 2. Médias ($\pm$ DP) do NDVI (adimensional), albedo (α_{sup} , adimensional), temperatura de superfície (T_{sup} , K), saldo de radiação (R_n , W m⁻²), evapotranspiração (ET, mm dia⁻¹) e biomassa (kg ha⁻¹ dia⁻¹).

Data	Talhão	NDVI	α_{sup}	T_{sup}	R_n	ET	Biomassa
19/04/2019	A	0,81 ($\pm 0,01$)	0,17 ($\pm 0,004$)	300,73 ($\pm 0,56$)	562,53 ($\pm 3,99$)	3,81 ($\pm 0,21$)	193,77 ($\pm 12,62$)
	B	0,82 ($\pm 0,01$)	0,17 ($\pm 0,004$)	300,71 ($\pm 0,64$)	560,81 ($\pm 4,69$)	3,79 ($\pm 0,27$)	195,76 ($\pm 15,35$)
05/05/2019	A	0,81 ($\pm 0,01$)	0,17 ($\pm 0,004$)	300,23 ($\pm 0,32$)	567,40 ($\pm 2,89$)	3,45 ($\pm 0,51$)	154,61 ($\pm 24,36$)
	B	0,82	0,17	300,11	564,95	3,58	163,74

		(±0,01)	(±0,004)	(±0,51)	(±4,03)	(±0,79)	(±38,56)
21/05/2019	A	0,74	0,15	297,71	550,07	3,56	167,52
		(±0,02)	(±0,004)	(±0,85)	(±4,79)	(±0,32)	(±18,01)
	B	0,79	0,16	296,68	547,86	3,70	189,52
		(±0,01)	(±0,006)	(±0,90)	(±5,02)	(±0,28)	(±17,38)
06/06/2019	A	0,50	0,13	298,10	535,48	2,74	80,36
		(±0,04)	(±0,004)	(±0,54)	(±3,21)	(±0,16)	(±11,32)
	B	0,60	0,13	296,94	538,55	3,00	112,11
		(±0,04)	(±0,007)	(±0,71)	(±4,14)	(±0,18)	(±15,36)

DP: desvio padrão.

Estes menores valores de NDVI indicam que em 06 de junho o milho plantado estava na fase de murcha permanente, pronto para a colheita. Em contrapartida, com valores de NDVI tão elevados, nos dias 19 de abril e 05 de maio (57 e 73 dias após a semeadura, respectivamente), o milho presente em ambos os talhões se encontrava no ápice de sua biomassa, em pleno crescimento. Corroborando com os resultados de Bertolin *et al.* (2017) que trabalharam com milho irrigado no Oeste do Estado da Bahia, em que os valores de NDVI em abril e maio foram em média 0,8881.

É nítida a diferença do valor de NDVI nos talhões no decorrer do tempo. As duas primeiras datas avaliadas apresentaram índices maiores, já que o milho estava em sua fase vegetativa, com 38% a mais no talhão A e 27% no talhão B quando comparado com o dia 6 de junho. Sendo assim, o último dia avaliado indica que está no final de seu ciclo, pronto para colheita.

Os maiores valores de NDVI são explicados pela alta absorção da radiação eletromagnética no comprimento de onda do vermelho pela clorofila, nas folhas verdes, juntamente com a alta reflectância na faixa do infravermelho próximo em função da presença de clorofila e turgidez das folhas saudáveis. Entretanto, os menores valores estão relacionados às áreas de vegetação estressada, menos densas ou até mesmo áreas desnudas, ou seja, com o solo exposto (BARBOSA *et al.*, 2017).

Quanto ao albedo, as maiores médias estimadas neste estudo para a área com cultivo de milho foram para os dias 19 de abril e 05 de maio, e as menores para o dia 06 de junho, 24% menor (Tabela 2). Os valores estão de acordo com Giongo e Vettorazzi (2014) que observaram albedo entre 0,13 e 0,25 em áreas agricultáveis da Bacia do Rio Corumbataí, e Ferreira Jr. e Dantas (2018) em áreas agrícolas da bacia hidrográfica do Rio Pacoti, com variação de albedo entre 0,17 e 0,18.

Com relação às médias da temperatura de superfície (Tabela 2) ficam evidentes que os maiores valores médios ocorreram nos dias 19 de abril e 05 de maio, quando ambos ficaram na faixa de 300 K (27°C). Se comparado com as variáveis analisadas anteriormente, é possível observar que há uma relação entre elas, pois quanto maior o NDVI e albedo, maior também a temperatura de superfície.

Os menores valores de temperatura, apresentados na metade final do ciclo da cultura do milho podem ser justificados, conforme Rothmund *et al.* (2019), pela biomassa que atua como termorregulador, já que nas áreas com maior densidade de vegetação a energia disponível é direcionada ao processo de evapotranspiração, em forma de calor latente resfriando a superfície vegetada. Por outro lado, podem também ser justificados pelos menores valores de temperatura do ar nos meses de maio, junho e julho.

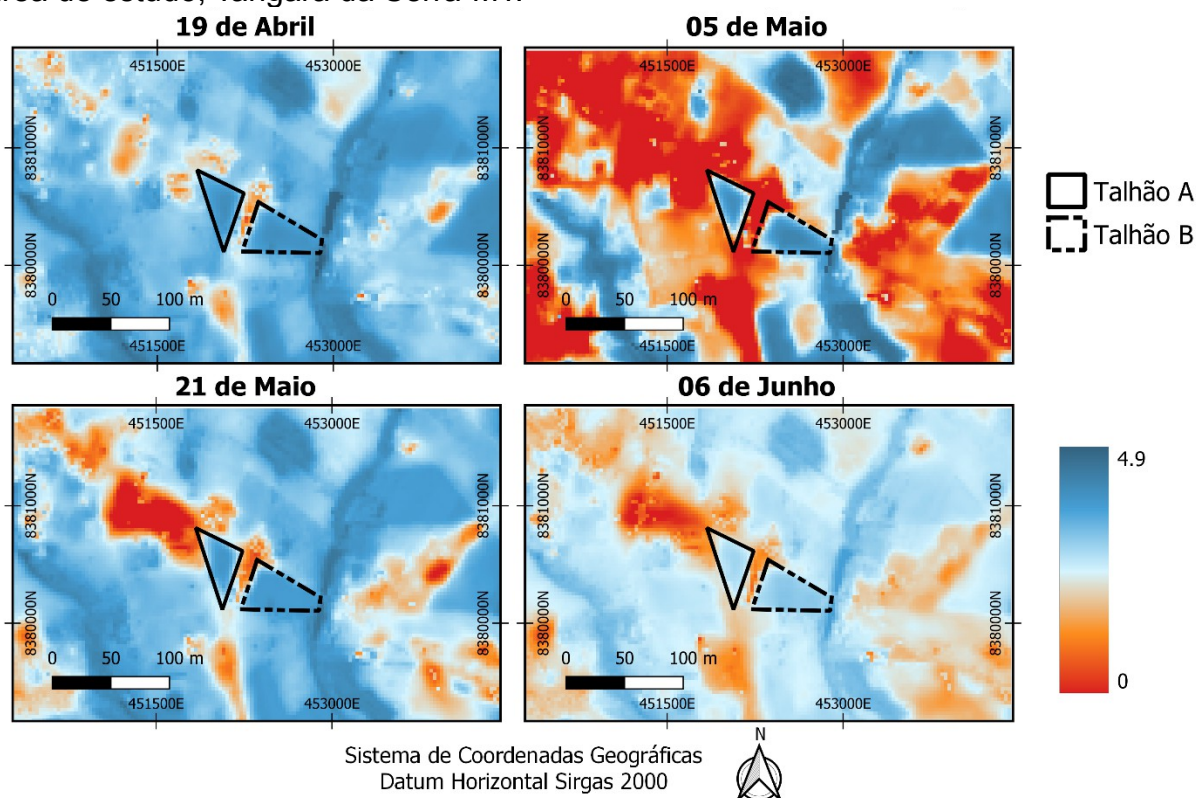
Quanto ao saldo de radiação, no dia 06 de junho, no talhão A houve uma diminuição de 6%, e no talhão B de 5%, quando comparados com o dia 05 de maio (Tabela 2). Conforme Fausto *et al.* (2016), as médias do saldo de radiação diminuem em função da menor cobertura vegetal e são maiores para as áreas de vegetação nativa, corroborando com as menores médias no dia 06 de junho, quando o milho já estava em ponto de murcha permanente, e as maiores do dia 05 de maio.

Esse contexto é explicado por Veloso (2020), em que maior incidência de radiação de onda curta, maior será o saldo de radiação à superfície, sendo possível concluir que há uma interferência direta deste componente, bem como uma interferência do tipo de cobertura do solo e dos fluxos de calor latente, sensível e no solo. A evapotranspiração também varia de acordo com o saldo de radiação, sendo assim, quanto maior o saldo de radiação maior a evapotranspiração real (MARTINS; ROSA, 2019).

Os valores estimados de evapotranspiração não foram decrescentes conforme as variáveis anteriores, no entanto, houve um padrão de maiores e menores valores na primeira e última data avaliada, respectivamente. Para o dia 19 de abril, no talhão A estimou-se uma média de 3,81 mm dia⁻¹, e no B 3,79 mm dia⁻¹. Enquanto que no talhão A no dia 06 de junho ocorreu a menor média de todas, 2,74 mm dia⁻¹, e 3 mm dia⁻¹ no talhão B (Tabela 2).

A evapotranspiração decresceu no último dia avaliado, de 28% no talhão A, quando comparado com o primeiro dia, e 21% no talhão B. Valores que confirmam que a cultura já estava no final do ciclo. Na carta temática dos valores diários de evapotranspiração real (ET) observa-se a variabilidade espacial dentro dos talhões (Figura 2).

FIGURA 2. Distribuição espacial da Evapotranspiração Real Diária (mm dia⁻¹) na área de estudo, Tangará da Serra-MT.



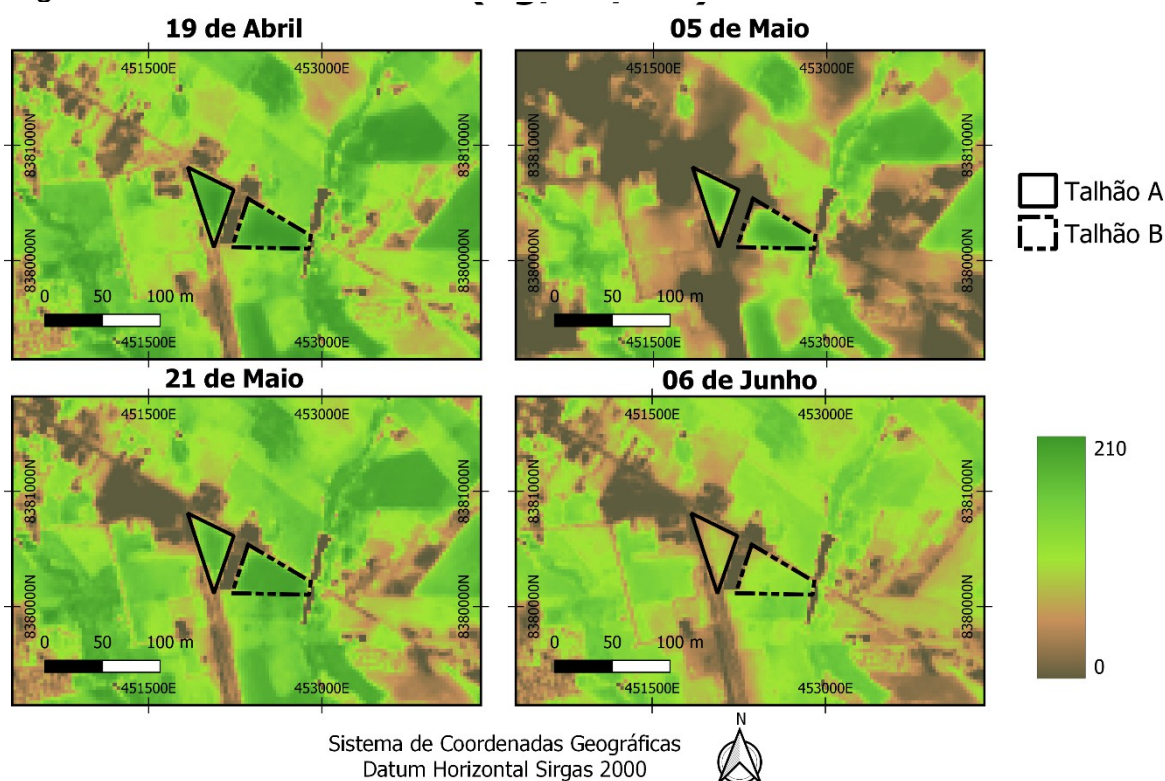
Fonte: Os autores (2021).

Essa estimativa da variação da evapotranspiração no espaço é uma das maiores vantagens do sensoriamento remoto, em que se pode analisar a sua variabilidade em grandes áreas para tomada de decisão quanto ao manejo da irrigação, já que a evapotranspiração varia espacialmente de acordo com os elementos componentes da cena, componentes climáticos, assim como a própria variação temporal (VELOSO, 2017).

Essa é uma variável de grande importância para as culturas, já que o balanço que ocorre entre a água que entra na cultura e a que sai pela evapotranspiração, irá resultar na variação do armazenamento de água no solo que, por sua vez condicionará o crescimento, o desenvolvimento, o rendimento e, conseqüentemente, a produtividade.

Quanto à biomassa, utilizada neste estudo para estimar da produtividade, as médias mais altas foram no dia 19 de abril, como se pode observar na Tabela 2 e na Figura 3, com $193,77 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no talhão A e $195,76 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no talhão B. No dia 21 de maio, o talhão B também apresentou um alto valor de biomassa, com $189,52 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Os valores do dia 06 de junho foram menores em 59% no talhão A e 43% no talhão B, quando comparados com o dia 19 de abril.

FIGURA 3. Distribuição espacial da Biomassa ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) na área de estudo, Tangará da Serra-MT.



Fonte: Os autores (2021).

Oliveira *et al.* (2016) estimou valores de biomassa superiores, que se justificam pelo fato de que a área avaliada por eles era de pivôs de irrigação, e do atual estudo é de milho em sequeiro, o que claramente afetou para que houvesse esta discrepância nos valores, e produzisse uma menor biomassa.

Após avaliados os dados de produtividade potencial estimada e produtividade real estimada, ficou evidente a diferença dos valores médios obtidos para cada uma destas variáveis. A produtividade real foi estimada, em média, cerca de 26% menor

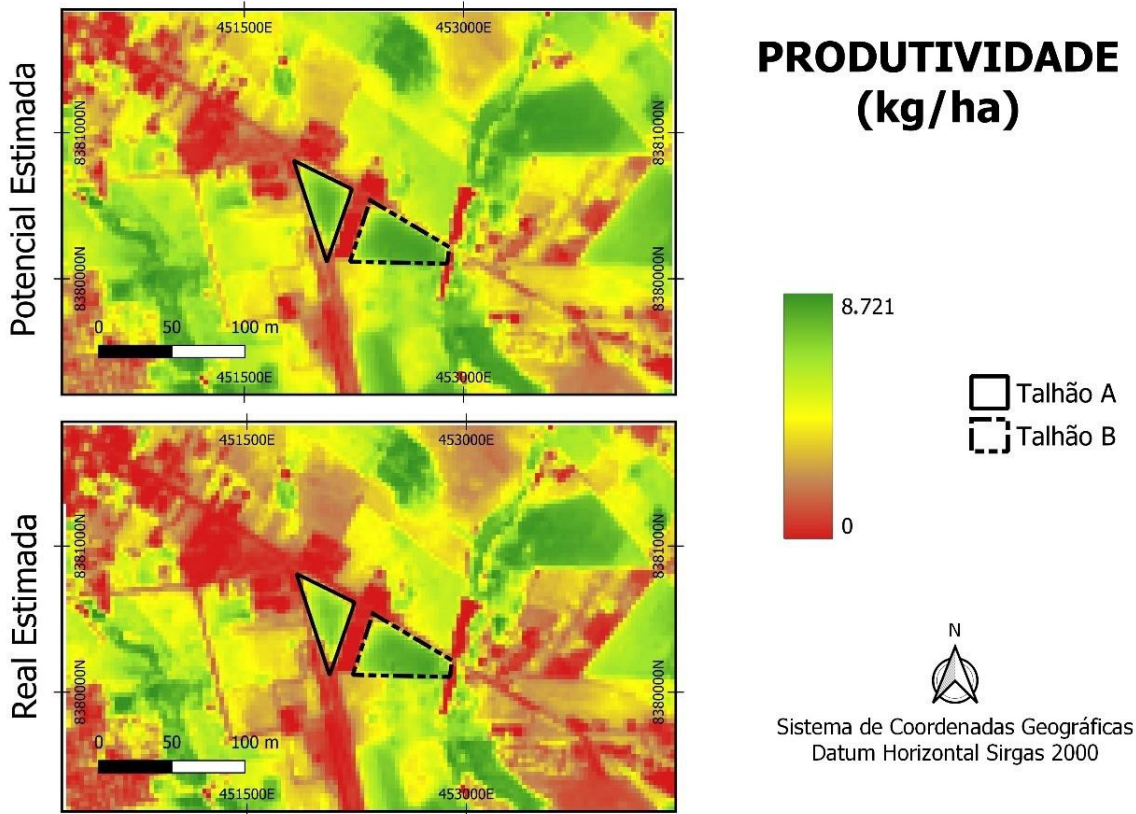
do que a produtividade potencial, para os dois talhões em conjunto (Tabela 3). Na Figura 4 observa-se que quanto maior a intensidade do verde, maior a produtividade.

TABELA 3. Médias ($\pm$ DP) das Produtividades Potencial Estimada e Real Estimada (Kg ha^{-1}).

	Produtividade Potencial Estimada
Talhão A	7110,36 ($\pm 665,44$)
Talhão B	7709,18 ($\pm 887,79$)
Média dos talhões	7492,22 ($\pm 862,29$)

Nos estudos realizados por Oliveira *et al.* (2016) também houve diferença entre os valores estimados para produtividade real pelo índice de NDVI e a produtividade potencial. Eles observaram que a produtividade real foi menor em até 55% dependendo do pivô irrigado, quando comparada com a produtividade potencial, valor este que corrobora os estimados no presente estudo.

FIGURA 4. Distribuição espacial da Produtividade Potencial Estimada e Produtividade Real Estimada (Kg ha^{-1}) na área de estudo, Tangará da Serra-MT.



Fonte: Os autores (2021).

A produtividade avaliada em campo, obtida por meio dos maquinários agrícolas da propriedade, no ano de 2019, foi de 106 sacas por hectare, ou 6.360 kg ha^{-1} para ambos os talhões. Isto indica que a produtividade potencial estimada foi maior em 18%, e a produtividade real estimada pelo conjunto de imagens de satélite foi subestimada em 12%. O que concorda com os resultados de Bertolin *et al.* (2017) que também tiveram a produtividade real subestimada de 0,35% a 12,64% ao

analisar 17 pivôs de milho irrigado. Assim como o Oliveira *et al.* (2016) que observaram subestimativa média de 0,27% em pivôs irrigados na safra 2011.

Estes resultados indicam potencial para estimar a produtividade antes da colheita possibilitando o planejamento das operações de transporte e armazenamento dos grãos (BERTOLIN *et al.*, 2017). Porém, esses modelos que utilizam uma relação estatística entre índices de vegetação e produtividade tem a desvantagem de requerem medições a campo em escala regional para validação dos mesmos, o que é laborioso e oneroso (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Este modelo multiespectral, com uma disponibilidade maior de imagens de satélite durante o período de desenvolvimento da cultura, possivelmente geraria estimativas de produtividade mais precisas. Porém, a presença de nuvens nas cenas é o maior problema que desafia os pesquisadores (ARAÚJO *et al.*, 2015) e dificulta a obtenção de uma série de imagens durante todo o ciclo da cultura.

Para contornar este problema, uma alternativa seria a utilização de imagens de um satélite com o período de revisada menor, já que o Landsat é de 16 dias. Mas isso implicaria em uma menor resolução espacial, com é o caso das imagens MODIS. Já existem satélites com imagens gratuitas, resolução espacial melhor e período de revisada menor que o Landsat, porém sem a banda termal, o que torna impossível a execução do modelo de estimativa testado neste estudo.

CONCLUSÃO

As variáveis estimadas como a evapotranspiração, NDVI, albedo, temperatura de superfície, saldo de radiação e biomassa, foram maiores em 19 de abril, aos 57 dias após a semeadura do milho, dentre as datas analisadas por imagem de satélite.

A produtividade foi subestimada em 12%, ou seja, foi menor que a produtividade real do campo, o que pode ser devido ao número limitado de imagens de satélite de boa qualidade que contemplasse o ciclo completo do milho.

Os resultados obtidos por meio do algoritmo SEBAL possibilitaram evidenciar a variabilidade espacial de variáveis biofísicas, da evapotranspiração e da produtividade, além de ser uma ferramenta prática e econômica no monitoramento da lavoura e gestão dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W.; WATERS, R. **SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and Users Manual**, Version 1.0. Estados Unidos da América: University of Idaho. 2002. Disponível em: <<http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>>.

ARAÚJO, G. L.; MANTOVANI, E. C.; VIEIRA, G. H. S.; COSTA, M. S. Modelos para a Estimativa da Produção de Biomassa aplicados à Cultura do Milho. **Revista Pensar Acadêmico**, v. 12, n. 1, p. 43-56, 2015. doi:10.21576/pa.2015v12i1.208

BARBOSA, A. H. S.; CARVALHO, R. G.; CAMACHO, R. G. V. Aplicação do NDVI para a Análise da Distribuição Espacial da Cobertura Vegetal na Região Serrana de Martins e Portalegre – Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 33, p. 128-143, 2017. doi: 10.11606/rdg.v33i0.128171

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000. doi: 10.1016/S0022-1694(99)00202-4

BASTIAANSSEN, W. G. M.; ALI S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 94, n. 3, p. 321-340, 2003. doi: 10.1016/S0167-8809(02)00034-8

BERTOLIN, N. O.; FILGUEIRAS, R.; VENANCIO, L. P.; MANTOVANI, E. C. Predição da Produtividade de Milho Irrigado com Auxílio de Imagens de Satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1627-1638, 2017. doi: 10.7127/rbai.v11n400567

BORGES, P. H. M.; MORAIS, P. H. M.; MENDOZA, Z. M. S. H.; REIS, G. A. Uso da calorimetria para o manejo de ervas daninhas em culturas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 32, p. 500- 509, 2020. doi: 10.18677/EnciBio_2020B46

CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento. **Informações Agropecuárias: Safras**. 2019. Disponível em: <www.conab.gov.br>

CUSTÓDIO, F. **Produtividade do milho cresceu quase 70% no Brasil nos últimos 20 anos**. São Paulo: Canal Rural. 2020. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/sites-e-especiais/mais-milho/produtividade-do-milho-cresceu-quase-70-no-brasil-nos-ultimos-20-anos/>>

DALLACORT, R.; MARTINS, J. A.; INOUE, M. H.; FREITAS, P. S. L.; COLETTI, A. J. Rain distribution in Tangará da Serra, mid-northern Mato Grosso state, Brazil. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 193-200, 2011. doi: 10.4025/actasciagron.v33i2.5838

DALLACORT, R.; MOREIRA, P. S. P.; INOUE, M. H.; SILVA, D. J.; CARVALHO, I. F.; SANTOS, C. Wind speed and direction characterization in Tangará da Serra, Mato Grosso state, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 359-364, 2010. doi: 10.1590/S0102-77862010000300007

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Serviço de Produção de Informação. 2006. 412p.

FAUSTO, M. A.; ANGELINI, L. P.; MARQUES, H. O.; SILVA FILHO, A.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato Grosso. **Revista Ambiente e Água**, v. 11, n. 2, p. 350-361, 2016. doi: 10.4136/ambi-agua.1843

FERREIRA, A. B. R.; PEREIRA, G.; FONSECA, B. M.; CARDOZO, F. S. As mudanças no uso e cobertura da terra na região Oeste da Bahia a partir da expansão agrícola. **Revista Formação (Online)**, v. 28, n. 53, p. 389-412, 2021. Disponível em: <<https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/7871/6028>>

FERREIRA Jr., J. J.; DANTAS, M. J. F. Análise do albedo da superfície e de índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Pacoti/CE. **Revista Tecnologia**, versão eletrônica, 2018. doi: 10.5020/23180730.2018.8132

FIGUEIREDO, H. R.; GRIS, D.; DALMAS, F. B.; LOUBET, L. F.; PARANHOS FILHO, A. C. Análise de impactos ambientais através de geotecnologias em área úmida no município de Bonito - MS, Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 31, p. 13-26, 2020. doi: 10.18677/EnciBio_2020A2

FRANÇA J. F.; SOUZA, C. C.; GARCIA, A. P.; CARNEIRO Jr., J. B. A.; CASTELÃO, R. A. Previsão da produção de soja utilizando imagens de satélite e lógica *Fuzzy*. **Ensaio e Ciência**, v. 25, n. 2, p. 232-238, 2021. doi: 10.17921/1415-6938.2021v25n2p232-238

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 8, p. 833-838, 2014. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v18n08p833-838

GUERINI FILHO, M.; KUPLICH, T. M. Avaliação de dados hiperespectrais como preditores para biomassa de campos nativos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, p. 856-877, 2019. doi: 10.14393/rbcv71n3-44114

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro, v. 8, p. 1-105, 2019. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73096>>

LOPES, J. A.; CARVALHO, J. M.; LEITÃO, F. O. Fatores de sucesso no relacionamento entre comprador e fornecedor na indústria de sementes de milho. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, n. 4, p. 1-18, 2021. doi: 10.1590/1806-9479.2021.229897

LUCENA, C. A. A.; COSTA, S. C.; ELEMEN, G. R. A.; MENDONÇA, E. A. M.; OLIVEIRA, E. E. Development of xylan and xylan/gelatin biofilms for production of biodegradable packages. **Polímeros**, v. 27, p. 35-41, 2017. doi: 10.1590/0104-1428.2223

MACHADO R. W. B.; CALVI, V. O.; PACCOLA, E. A. S.; SCHIMDIT FILHO, E.; GASPAROTTO, F. Inoculação foliar de plantas de milho com *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasilense*. **Enciclopédia Biosfera**, v. 17, n. 34, p. 289-298, 2020. doi: 10.18677/EnciBio_2020D22

MARTINS, A. P.; ROSA, R. Real evapotranspiration estimate from images of MODIS/AQUA sensor and SEBAL algorithm in Paranaíba river basin – Brazil. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 57, p. 351-367, 2019. doi: 10.5752/P.2318-2962.2019v29n57p351-367

MORAIS, Y. C. B.; ARAÚJO, M. S. B.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MIRANDA, R. Q. Analysis of Carbon Sequestration in Caatinga Areas of

Pernambucano Semiárid. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585-599, 2017. doi: 10.1590/0102-7786324007

OLIVEIRA, L. A. M.; AZEREDO, R. A.; ARAÚJO, G. L.; MANTOVANI, E. C. Estimativa de Produção em Áreas Irrigadas sob o Cultivo da Cultura do Milho utilizando Imagens de Satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 1, p. 400-409, 2016. doi: 10.7127/rbai.v10n100321

QGIS Development Team. (2019). **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>

ROCHA L.; RODRIGUES, C.; SANTANA, L.; SILVA, A.; ARAÚJO, M. Análise econômica de soja e milho safrinha em sucessão de culturas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 16, n. 29, p. 130-140, 2019. doi: 10.18677/EnciBio_2019A9

RODRIGUES, C.; RIBEIRO, F.; SILVA, A.; ARAÚJO, M. Análise econômico-financeira da implantação do cultivo de milho-verde. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 9, p. 19-29, 2018. doi: 10.18677/Agrarian_Academy_2018a3

ROTHMUND, L. D.; ALMEIDA Jr.; E. S.; LIMA, L. P. A.; MASSAD, H. A. B.; PALÁCIOS, R. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; NOGUEIRA, J. S. Impacto da alteração da cobertura do solo nos parâmetros biofísicos no sul da floresta amazônica por sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 122-137, 2019. doi: 10.5380/abclima.v25i0.62677

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 2, p. 18-23, 2008. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51)

TEIXEIRA, A. H. C.; SHERER-WARREN, M.; HERMANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. Water productivity assessment by using MODIS images and agrometeorological data in the Petrolina municipality, Brazil. **Proceedings**, v. 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV; 85310G, 2012. doi: 10.1117/12.974376

VEIGA, A. J. P.; MATTA, J. M. B.; VEIGA, D. A. M.; BOMFIM, C. S. S. Analysis of the use and land cover in Itapetinga in the state of Bahia, Brazil, using Remote Sensing and GIS. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.9, p. 73928-73947, 2020. doi: 10.34117/bjdv6n9-741

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E.; SILVA, B. B. Determinação da evapotranspiração real diária em áreas irrigadas do Projeto Jaíba (Minas Gerais, Brasil), mediante imagens Landsat 5 - TM. **Revista Cerrados**, v. 15, n. 01, p. 53–76, 2017. doi: 10.22238/rc24482692v15n12017p53a76.

VELOSO, G. A.; SILVA, L. A. P.; FERREIRA, M. E. Análise do balanço de radiação e energia em áreas de veredas no Norte de Minas Gerais, bioma cerrado. **Revista Cerrados**, v. 18, n. 01, p. 220–247, 2020. doi: 10.22238/rc244826922201801220247.