**GRAZIELLE MARTINEZ DA SILVA** 

MODELAGEM DE DADOS METEOROLÓGICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA NO CERRADO MATO-GROSSENSE

> TANGARÁ DA SERRA/MT – BRASIL 2019

## **GRAZIELLE MARTINEZ DA SILVA**

## MODELAGEM DE DADOS METEOROLÓGICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA NO CERRADO MATO-GROSSENSE

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pósgraduação Stricto Sensu em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rivanildo Dallacort Co-orientadores: Dra. Maria Carolina da Silva Andrea Prof. Dr. Rafael Tieppo

## TANGARÁ DA SERRA/MT – BRASIL 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586m	Silva, Grazielle Martinez da Modelagem de dados meteorológicos e de sensoriamento remoto aplicado à agricultura no cerrado Mato-Grossense. / Grazielle Martinez da Silva. — 2019. 100 f. : il. color.		
	Dissertação (Mestrado) – Unemat. Programa de Pós- graduação Stricto Sensu em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, Tangará da Serra, 2019. Orientação: Prof. Dr. Rivanildo Dallacort. Co-orientadores: Dra. Maria Carolina da Silva Andrea; Prof. Dr. Rafael Tieppo.		
	1. Sensoriamento Remoto. 2. Climatolog Meteorologia. 4. Agricultura I. Título.	atologia. 3. CDU: 551.5:631	

Bibliotecária: Áurea Regina Meira Cavalcante CRB1/ 2752

## FOLHA DE APROVAÇÃO

#### **GRAZIELLE MARTINEZ DA SILVA**

## "MODELAGEM DE DADOS METEOROLÓGICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA NO CERRADO MATO -GROSSENSE"

Dissertação apresentada å Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Ambiente e Sistemas de Produção Agricola para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 26 de agosto de 2019.

Banca Examinadora 44.7 Prof. Dr. Rivanildo Dallacort Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT Orientador

Profa. Dra. Alessandra Regina Butnariu Coordenadora do Mestrado em Ambiente e Sistema de Produção Agricola-PPGASP/UNEMAT Atesta a participação de: Prof. Dr. Jefferson Vieira José Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT (Membro Externo - Participação por Videoconferência)

Olemandria Regina Buthariu Profa. Dra. Alessandra Regina Buthariu Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT Membro interno

TANGARÁ DA SERRA/MT- BRASIL

2019

### AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho representa uma conquista pessoal, que foi possível graças ao apoio de muitas pessoas, assim, meus sinceros agradecimentos:

À Deus pela misericórdia e promessas cumpridas na minha vida. Ao meu Senhor e Salvador Jesus Cristo, autor e consumador da minha fé.

Aos meus pais, Moacir e Elizabete, minhas irmãs, Francielle e Lilian (negas), pelo incentivo e apoio incondicional desde sempre. Obrigada pelas orações e por me fortalecerem com o carinho e amor de vocês ao longo dessa caminhada.

Ao meu namorado Pedro Alexandre por todo carinho e amor, pelos sábios conselhos, por estar e ser presente em minha vida.

Aos meus familiares que mesmo distantes se fazem presentes através de mensagens de apoio e incentivo. Aos meus amigos "Qualis A" Camila, Bruna e Alexander pela amizade e trocas de conhecimento. À amiga Miriam Inoue pelo incentivo e amizade.

Ao Dr. Rivanildo Dallacort pela orientação, ensinamentos, direcionamento ao longo dessa caminhada, compreensão e incentivo nos momentos de dificuldades.

Ao Dr. Rafael e a Dra. Maria Carolina pela co-orientação e contribuição na execução desse projeto. Ao Dr. Tadeu e Dra. Alessandra pelas contribuições. Ao Dr. Jefferson por toda ajuda e orientações que engrandeceram o trabalho.

À UNEMAT e ao PPGASP pela oportunidade, aos docentes pelo conhecimento compartilhado, e a Liane pelos atendimentos. Aos colegas de trabalho do CETEGEO-SR, especialmente a Dra. Edenir, Julia, Emily e Adelair.

À CAPES (Coordenação de Apoio e Pesquisa do Ensino Superior), pela concessão da bolsa de mestrado.

Agradeço sobremaneira a Dra. Vanessa Rakel Dias pela dedicação com o meu trabalho, horas de estudo dedicada e conhecimentos compartilhados, por me motivar a cada desafio encontrado, por sua generosidade, empatia, amizade e exemplo de conduta.

Ao Grupo SLC Agrícola, Fazenda Paiaguás, nas pessoas dos Srs. Evandro Dal Bem e Valcilene Melo, pela disponibilização da área de estudo. A amiga Jucielle Kottwitz por todo suporte na realização dessa pesquisa.

#### OBRIGADA

À minha mãe Elizabete, por ser exemplo de mãe e serva do Senhor, por seu caráter invejável e coração nobre, por uma vida dedicada às filhas, e pelo amor que dá sentido e esperança aos meus dias,

## DEDICO

Ao meu pai Moacir, às minhas irmãs Francielle e Lilian e ao meu namorado Pedro Alexandre,

## OFEREÇO

"MÃE

Mãe... São três letras apenas As desse nome bendito; Também o Céu tem três letras... E nelas cabe o infinito.

Para louvar nossa mãe, Todo o bem que se disser Nunca há de ser tão grande Como o bem que ela nos quer.

Palavra tão pequenina, Bem sabem os lábios meus Que és do tamanho do Céu E apenas menor que Deus!"

Mário Quintana

RESUMO	8
ABSTRACT	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ARTIGO I	16
FREQUÊNCIA DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS APTAS À APLICAÇÂ	Ó DE
FUNGICIDAS NA SOJA NĂ REGIÃO DE TANGARÁ DA SERRA – MT	16
RESUMO	16
ABSTRACT	16
INTRODUÇÃO	17
MATERIAL E MÉTODOS	18
RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
Temperatura do ar	24
Umidade relativa do ar	31
Velocidade do vento	34
CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ARTIGO II	46
MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL COM SEBAL NA CULTU	JRA DO
ALGODÃO EM ÁREA AGRÍCOLA DO CERRADO	46
RESUMO	46
ABSTRACT	47
INTRODUÇÃO	47
MATERIAL E MÉTODOS	50
Área de estudo	50
Dados meteorológicos	51
Imagens de satélite	51
Implementação do Algoritmo SEBAL	52
Análise estatística	63
RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
Ciclo da cultura e análise micrometeorológica	64
Índices de vegetação: NDVI e IAF	69
Albedo da superfície	75
Temperatura da superfície	76
Fluxo de calor no solo	78
Saldo de radiação instantâneo e saldo de radiação médio diário	79
Evapotranspiração real diária	80
CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	100

# SUMÁRIO

### RESUMO

A agricultura moderna reguer a cada dia novos fatores de planejamento e manejo, para o aumento da produtividade. A variabilidade climática influencia as práticas agrícolas, e, muitas vezes, o insucesso da atividade é atribuído a inobservância dos limites impostos pelas condições climáticas. O presente trabalho teve por objetivo analisar a dinâmica climática no planejamento da pulverização de fungicidas e a modelagem da evapotranspiração com sensoriamento remoto. Dois artigos compõe o estudo, o primeiro teve como objetivo analisar a variabilidade decendial e horária das variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) no município de Tangará da Serra - MT. Portanto, para determinação dos horários aptos à aplicação de fungicidas na cultura da soja foram analisados os decêndios (DEC) 34, 35, 36 e 01, onde concentram-se as aplicações. A classificação das condições meteorológicas "aptas", foi realizada com base nos dados meteorológicos horários da estação meteorológica automática de Tangará da Serra, dos anos de 2004 a 2017, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Adotou-se os seguintes parâmetros para clima "apto": velocidade do vento  $\ge 0.83 \le 2.77$  m s<sup>-1</sup>, umidade relativa do ar  $\ge 50\%$  e temperatura do ar  $\le 30$  °C. Os resultados, de 41,54 a 54,55% dos registros horários, nos decêndios 34, 35, 36 e 01, apresentaram condições climáticas adequadas de temperatura do ar e de velocidade do vento, entre as 05:00 e 07:00 horas da manhã. No horário entre 8 e 10 horas as frequências de condições ideais foram, em média, de 32,21% (DEC 34), 27,60% (DEC 35), 23,04% (DEC 36) e 24,76% (DEC 1). Em média 73,10% dos eventos foram classificados como inaptos nesse período. A maior interferência nesses horários, de modo geral, é representada pelos ventos acima de 2,77 m s<sup>-1</sup> (entre 42,26 e 50,41%) das observações). Devido às temperaturas elevadas (>30,0 °C), as frequências "aptas" foram inferiores a 10,0% às 13:00 horas. A partir das 19:00 horas a temperatura deixou de ser um fator limitante, e as condições climáticas aptas ficaram próximas a 50.0%, o que possibilita aplicações no período noturno. O segundo artigo teve por objetivo determinar o balanço de radiação em superfície, a evapotranspiração real, e os índices biofísicos em área de cultivo de algodão por meio do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land). Para tanto, foram utilizados dados meteorológicos provenientes de estação automática e dados de campo coletados em quatro áreas de cultivo de algodão, cultivares TMG 43 WS e FM 940 GLT, do ano de 2015 na Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT. As cenas utilizadas do satélite Landsat 8, compreenderam a órbita/ponto 227/70 dos dias 03/02/2015, 26/05/2015 e 14/08/2015, correspondente às fases de desenvolvimento da cultura I (semeadura até 10% de cobertura de solo), III (início da floração ao início da maturação) e IV (início ao final da maturação), respectivamente. Para análise dos parâmetros estimados foram selecionados dois recortes em ambas as cultivares, com 1726 pixels cada. O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Área Foliar (IAF) se mostraram um bom indicador do desenvolvimento do algodoeiro em ambas as cultivares. A variabilidade dos parâmetros biofísicos albedo de superfície e temperatura da superfície apresentaram valores compatíveis com as fases de desenvolvimento da cultura. O particionamento de energia foi semelhante entre as áreas para uma mesma cultivar. Os percentuais do saldo de radiação (Rn) convertidos em calor latente (LE) ficaram entre 51,74% (TMG 43 WS) e 31,63% (FM 940 GLT) em 03/02; e acima de 83,0% em 26 de maio, em ambas as cultivares. A ETr na fase inicial (03/02) foi maior nas áreas com TMG 43 WS (2,81 e 3,01 mm dia<sup>-1</sup>). Na fase de máxima cobertura do solo (26/05), a ETr média foi semelhante entre as cultivares (3,3 mm dia<sup>-1</sup>), tais valores podem ser atribuídos à demanda evaporativa baixa, representada pela evapotranspiração de referência nessa data. No final do ciclo a ETr média foi de 2,0 mm dia<sup>-1</sup> nas áreas com TMG 43 WS, e de 1,72 mm dia<sup>-1</sup> nas áreas com FM 940 GLT. A ETr obtida com o SEBAL diferiu da metodologia padrão recomendada pela FAO, com erro quadrático médio de 1,41 mm dia<sup>-1</sup> (TMG 43 WS), e 1,53 mm dia<sup>-1</sup> (FM 940 GLT). Os valores do coeficiente de cultivo do algodão nas fases I, foram de 0,60 e 0,64 (TMG 43 WS); 0,30 e 0,44 (FM 940 GLT); na fase III, 0,90 e 0,89 (TMG 43 WS); 0,88 e 0,87 (FM 940 GLT); na fase IV 0,35 e 0,38 (TMG 43 WS); 0,33 e 0,31 (FM 940 GLT). Portanto, conclui-se que as informações geradas pelo SEBAL podem auxiliar na compreensão das dinâmicas ocorridas nas áreas agrícolas de cultivo de algodão no Cerrado, e que melhores resultados podem ser obtidos com calibrações locais ou regionais.

Palavras-chave: Evapotranspiração; variabilidade climática; parâmetros biofísicos.

## ABSTRACT

Modern agriculture requires new planning and management factors every day to increase productivity. Climate variability influences agricultural practices, and often the failure of the activity is attributed to non-compliance with the limits imposed by climatic conditions. The present work, composed of two articles, aimed to analyze the climate dynamics in the planning of fungicide spraying and the modeling of remote sensing evapotranspiration. The first article aimed to analyze the ten-day and hourly variability of meteorological variables (air temperature, relative humidity and wind speed) in the municipality of Tangará da Serra - MT. Therefore, to determine the times suitable for fungicide application in soybean crops, the ten-day (TD) 34, 35, 36 and 01 were analyzed, in which the applications are concentrated. The classification of the weather conditions into "suitable" or "unsuitable" was based on the hourly weather data of the Tangará da Serra automatic weather station, from 2004 to 2017, provided by the National Institute of Meteorology (INMET). The following parameters were adopted for "suitable" climate: wind speed  $\ge 0.83 \le 2.77$  m s<sup>-1</sup>, relative air humidity  $\ge 50\%$  and air temperature ≤ 30 ° C. The results of 41.54 and 54.55% of the hourly records for decays 34, 35, 36 and 01 presented adequate climatic conditions of air temperature and wind speed between 05:00 and 07:00 o'clock in the morning. In the hours between 8 and 10 o'clock, the ideal conditions frequencies were, on average, 32.21% (TD 34), 27.60% (TD 35), 23.04% (TD 36) and 24.76% (TD 1). On average, 73.10% of the events were classified as "unsuitable" during this period. The greatest interference at these times, in general, is represented by wind above 2.77 m s<sup>-1</sup> (between 42.26 and 50.41% of observations). Due to high temperatures (> 30.0 ° C), "suitable" frequencies were less than 10.0% at 1:00 pm. After 7:00 pm the temperature was no longer a limiting factor, and the "suitable" weather conditions were close to 50.0%, what allows applications at night. The second article aimed to determine the surface radiation balance, the real evapotranspiration, and the biophysical indexes in cotton growing area by the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) algorithm. For this, we used meteorological data from automatic station and field data collected in four cotton

Fazenda Pajaguás, Diamantino - MT, The scenes used from the Landsat 8 satellite comprised the orbit/point 227/70 of 02/03/2015, 05/26/2015 and 08/14/2015, corresponding to the stages of development of culture I (sowing up to 10% of soil cover), III (beginning of flowering to the beginning of maturation) and IV (beginning to the end of maturation), respectively. For analysis of the estimated parameters, two cuttings were selected in both cultivars, with 1726 pixels each. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Leaf Area Index (LAI) were a good indicator of cotton development in both cultivars. The variability of the surface albedo biophysical parameters and surface temperature presented values compatible with the culture development phases. Energy partitioning was similar between areas for the same cultivar. The percentages of the radiation balance (Rn) converted to latent heat (LE) were between 51.74% (TMG 43 WS) and 31.63% (FM 940 GLT) on February 3rd; and above 83.0% on May 26th in both cultivars. The ETr in the initial phase (02/03) was higher in the areas with TMG 43 WS (2.81 and 3.01 mm day<sup>-1</sup>). In the maximum soil cover phase (05/26), the average ETr was similar among the cultivars (3.3 mm day<sup>-1</sup>). Such values can be attributed to the low evaporative demand, represented by the reference evapotranspiration at that date. At the end of the cycle, the average ETr was 2.0 mm day<sup>-1</sup> in areas with TMG 43 WS, and 1.72 mm day<sup>-1</sup> in areas with FM 940 GLT. The ETR obtained with SEBAL differed from the standard methodology recommended by FAO, with mean square error of 1.41 mm day<sup>-1</sup> (TMG 43 WS) and 1.53 mm day<sup>-1</sup> (FM 940 GLT). The values of cotton crop coefficient in phases I were 0.60 and 0.64 (TMG 43 WS); 0.30 and 0.44 (FM 940 GLT); in phase III, 0.90 and 0.89 (TMG 43 WS); 0.88 and 0.87 (FM 940 GLT); in phase IV 0.35 and 0.38 (TMG 43 WS); 0.33 and 0.31 (FM 940 GLT). Therefore, it is concluded that the information generated by SEBAL can help to understand the dynamics that occur in the cotton cultivation areas in this vegetation (*Cerrado*), and that better results can be obtained with local or regional calibrations.

**Keywords**: Evapotranspiration; climate variability; biophysical parameters.

## INTRODUÇÃO GERAL

As atividades agrícolas são altamente dependentes das condições climáticas, uma vez que essas interferem diretamente sobre o ambiente de produção agrícola. O Estado de Mato Grosso possui sua economia voltada principalmente ao agronegócio. A expansão das áreas agrícolas no Estado coincide com a "revolução verde", ocorrida na década de 70. Desde então, os agricultores têm buscado meios para tornar o sistema de produção mais eficiente, fazendo uso de pacotes tecnológicos, melhoramento genético, fertilizantes químicos e defensivos agrícolas para controle de pragas doenças e plantas daninhas.

A variabilidade é um dos elementos mais conhecidos da dinâmica climática e seus impactos podem refletir nas atividades humanas, alterando tanto o sistema ambiental quanto o socioeconômico (QUEIROZ; COSTA, 2012). A variabilidade do clima de uma região apresenta valores específicos de umidade relativa do ar, temperatura do ar, precipitação, radiação entre outros parâmetros. Estima-se que cerca de um terço da variabilidade global da safra das culturas agrícolas sejam explicadas pelo clima, ao passo que a participação de outros fatores na produção agrícola, como agronômicos e biofísicos, ainda carecem de pesquisas (RAY; GERBER, 2015).

As variações micrometeorológicas podem dificultar algumas operações agrícolas como a pulverização de defensivos. O sucesso da operação depende de parâmetros operacionais, características do defensivo utilizado e condições meteorológicas. Nesse sentido, a análise de séries de dados climáticos locais possibilita compreender a sazonalidade do microclima norteando a tomada de decisão na agricultura. Desconsiderar os parâmetros climáticos recomendados, além de possibilitar uma aplicação ineficiente, implica em riscos potenciais de transporte do produto aplicado para fora da área de interesse, ocasionando contaminação dos seres humanos e ambiental.

Nos últimos anos, com a substituição das paisagens naturais por outros usos e ocupações da terra, vem se intensificando cada vez mais a busca por algoritmos que usem dados climáticos e de superfície nas pesquisas de modelagem aplicadas à geotecnologia, em escalas regionais e locais, para compreensão das dinâmicas dos fluxos de energia nos sistemas de produção agrícola. Com isso, o Sensoriamento Remoto (SR) tem se destacado como uma ferramenta eficaz de caracterização do meio ambiente através de imagens em diferentes escalas temporais e espaciais (VELOSO et al., 2015).

Uma das vantagens no uso de modelagem em sistemas agrícolas é o seu baixo custo em relação a outros métodos tradicionais. Os resultados obtidos em modelagem de fluxos de energia com o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) confirmam o potencial do algoritmo, que não se restringe a áreas irrigadas e pode ser aplicado a uma ampla gama de biomas, fornecendo informações espaciais em extensas áreas (RUHOFF et al., 2012).

Através de procedimentos computacionais, o SEBAL propicia a determinação dos balanços de radiação e de energia, e as estimativas do albedo de superfície, temperatura de superfície, Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Área Foliar (IAF) entre outros, sendo todos importantes no monitoramento ambiental e hídrico (VELOSO et al., 2015).

Na agricultura, as estimativas de evapotranspiração (ET) são frequentemente utilizadas para monitorar as secas, programar irrigação e avaliar a demanda hídrica das culturas em grandes áreas. Atualmente, medições *in situ* de ET são difíceis de ampliar para aplicações regionais, de modo que a tecnologia de sensoriamento remoto tem sido cada vez mais utilizada para estimativas da ET. O aumento da demanda da agricultura irrigada combinado com o aumento da demanda de outros setores concorrentes e em expansão, significa que uma melhor gestão da água na agricultura se faz necessária (MARSHALL et al., 2016)

Compreender a distribuição temporal e espacial da depleção evaporativa é essencial para a gestão das bacias hidrográficas e sistemas de abastecimento de água. As bacias hidrográficas possuem áreas de agricultura irrigada, agricultura de sequeiro, florestas, vegetação nativa, zonas húmidas, e de mata ciliar, todos os quais transmitem água para a atmosfera através da evapotranspiração (BASTIAANSSEN et al., 2005).

No Brasil, a distribuição de tipos de cobertura de terra é ocasionada por variações climáticas e influências antropogênicas, e em particular, o Estado de MT possui três ecossistemas diferentes, savana (Cerrado), zonas húmidas (Pantanal) e floresta amazônica, que estão dispostos ao longo de largos gradientes de clima (BIUDES et al., 2015). A interpretação dos valores de ET depende da compreensão

da fenologia da vegetação no momento da aquisição da imagem, porque eles são influenciados pela variação do tempo ao longo do ano (SANTOS et al., 2017)

Nesse sentido, o advento das geotecnologias, e a possibilidade de associar qualquer tipo de informação, mas principalmente as agrometeorológicas, ao espaço geográfico, possibilita a obtenção de maior número de informações meteorológicas globais, regionais e locais, e aumenta a possibilidade de sucesso do planejamento agrícola (VOLPATO; ALVES; VIEIRA, 2008).

Os valores de Rn são influenciados, não apenas pela radiação solar incidente, mas também pelo uso e cobertura do solo (ALVES et al., 2017). A substituição de uma cobertura natural para a implementação de uma monocultura modifica drasticamente os índices biofísicos, pela diminuição do NDVI, aumento do albedo e da temperatura da superfície e diminuição do saldo de radiação da superfície (MARTINS et al., 2015). O saldo de radiação, tipo de cobertura do solo e a disponibilidade hídrica, determinam a distribuição de energia no ambiente em calor latente, sensível e no solo (MARTINS et al., 2015).

Diante da importância dos elementos meteorológicos na agricultura são crescentes as pesquisas que abrangem a variabilidade climática e o uso de modelagem em áreas agrícolas, entretanto, no Estado de Mato Grosso, pouco se conhece a respeito dos processos de trocas de energia, em áreas de cultivo de algodão.

A partir do exposto o presente trabalho foi estruturado em dois artigos, nas perspectivas de variabilidade climática e modelagem com sensoriamento remoto. O primeiro artigo intitulado "Frequência de condições meteorológicas aptas à aplicação de fungicidas na soja na região de Tangará da Serra – MT", teve como objetivo analisar a variabilidade decendial e horária das variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) no município. O segundo artigo intitulado "Modelagem da Evapotranspiração real com SEBAL na cultura do algodão em área agrícola do Cerrado" teve por objetivo determinar o balanço de radiação em superfície e a evapotranspiração real em área de cultivo de algodão.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALVES, L. E. R.; GOMES, H. B.; SANTOS, M. N.; FREITAS, I. G. F. Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 33, p.117-127, 2017.

BASTIAANSSEN, 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. 2, 2005.

BIUDES, M. S.; VOURLITIS, G. L.; MACHADO, N. G.; ARRUDA, P. H. Z.; NEVES, G. A. R.; LOBO, F. A.; NEALE, C. M. U.; NOGUEIRA, J. S. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112–124, 2015.

MARSHALL, M.; THENKABAIL, P.; BIGGS, T.; POST, K. Hyperspectral narrowband and multispectral broadband indices for remote sensing of crop evapotranspiration and its components (transpiration and soil evaporation). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218–219, p. 122–134, 2016.

MARTINS, A. L.; CUNHA, C. R.; PEREIRA, V. M. R.; DANELICHEN, V. H. M.; MACHADO, N. G.; LOBO, F. A.; MUSIS, C. R.; BIUDES, M. S. Mudanças em índices biofísicos devido à alteração da cobertura do solo em área nativa de Cerrado em Mato Grosso. **Ciência e Natura**, v. 37 n. 4, p. 152-159, 2015.

QUEIROZ, A. T.; COSTA, R. A. Caracterização e variabilidade climática em séries de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação em Ituiutaba – MG. **Caminhos de Geografia**, v. 13, n. 43, p. 346-357, 2012.

RAY, D.; GERBER, J. Climate variability and extreme weather events and global crop production. American Society of Agricultural and Biological Engineers, In...:**Asabe 1st** 

Climate Change Symposium: Adaptation and Mitigation, 2015, Chicago, IL, p. 1-2, 3 maio, 2015. http://dx.doi.org/10.13031/cc.20152142779.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 703-725, 2012.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SILVA, A. M.; BRASIL NETO, R. M. Estimation of evapotranspiration for different land covers in a Brazilian semi-arid region: A case study of the Brígida River basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 74, p. 54-66, 2017.

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E.; ROSA, R.; SILVA, B. B. Determinação do albedo de superfície em áreas irrigadas do projeto Jaíba (Minas Gerais) mediante imagens Landsat 5 - TM. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 35, p. 126-146, 2015.

VOLPATO, M. M. L.; ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C. Geotecnologias aplicadas à agrometeorologia. Informe Agropecuário - Efeito das mudanças climáticas na agricultura. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 246, p. 1-10, 2008.

#### **ARTIGO I**

# Frequência de condições meteorológicas aptas à aplicação de fungicidas na soja na região de Tangará da Serra – MT

Grazielle Martinez da Silva

### RESUMO

O objetivo do trabalho foi modelar a variabilidade decendial e horária das variáveis meteorológicas temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento na região de Tangará da Serra – MT, para determinar os horários aptos à aplicação de fungicidas na cultura da soja. Os dados meteorológicos horários da estação automática do município de Tangará da Serra -MT, dos anos de 2004 a 2017, foram disponibilizados pelo Instituo Nacional de Meteorologia (INMET). Foram analisadas a variabilidade decendial (decêndios 01 ao 36) e horária nos decêndios que concentram as aplicações de fungicidas na cultura da soja: 34, 35, 36 e 01. Foram adotados os seguintes parâmetros como clima "apto" para aplicação: velocidade do vento  $\ge 0.83 \le 2.77$  m s<sup>-1</sup>, umidade relativa do ar  $\ge 50\%$  e temperatura do ar  $\le 30$  °C. A umidade relativa do ar não foi um fator limitante para aplicação nos decêndios 34, 35, 36 e 01. Devido as temperaturas máximas horárias, as condições "aptas" à aplicação são inferiores a 10% às 13:00 horas. Os horários com maior frequência de condições meteorológicas "aptas" concentraram-se entre as 5:00 e as 7:00 horas, e no período noturno a partir das 19:00 horas.

Palavras-chave: variabilidade; pulverização; clima.

### ABSTRACT

Frequency of suitable weather conditions for fungicide application in soybean in the region of Tangará da Serra – MT

The objective of this work was to model the ten-day and hourly variability of the meteorological variables: air temperature, relative humidity of the air and wind speed in the region of Tangará da Serra - MT, to determine the suitable time for fungicide application in soybean crops. The hourly weather data of the automatic station of the municipality of Tangará da Serra-MT, from 2004 to 2017 were made available by the National Institute of Meteorology (INMET). Ten-day variability (decays 01 to 36) and hourly variability were analyzed in the decays that concentrate fungicide applications in soybean: 34, 35, 36 and 01. The following parameters were adopted as "suitable" climate for application: wind speed  $\geq 0.83 \leq 2.77$  m s<sup>-1</sup>, relative humidity of the air  $\geq 50\%$  and air temperature  $\leq 30$  ° C. Relative humidity was not a limiting factor for application in decays 34, 35, 36 and 01. Due to the maximum hourly temperatures, "suitable" application conditions are less than 10% at 1:00 pm. The most frequent times of "suitable" weather conditions were concentrated between 5:00 and 7:00 am, and at night after 7:00 pm.

Keywords: variability; pulverization; climate.

## **INTRODUÇÃO**

O Estado de Mato Grosso possui grande diversidade geoambiental (clima, solo, relevo), que se deve à sua posição geográfica. Tal heterogeneidade ambiental influenciou o processo de ocupação e seus diferentes arranjos de uso do solo no Estado, que por sua vez alteraram as respostas do ambiente quanto às variáveis climáticas (Souza *et al.*, 2013).

Considerando que atividades agropecuárias são as principais fontes econômicas do Estado e altamente dependentes dos fatores climáticos, o entendimento de sua variabilidade, através da utilização de séries temporais, possibilita a implementação de pesquisas de adaptabilidade, rendimento e zoneamento agroclimático de culturas (Moreira *et al.*, 2015).

A tecnologia de aplicação nas lavouras continua sendo o ponto de estrangulamento para obter melhor eficácia e retorno econômico, superando problemas como a deposição efetiva do produto no alvo desejado (Azevedo, 2007). Algumas variáveis do ambiente exercem importante papel no êxito da aplicação, podendo auxiliar ou dificultar a deposição dos produtos fitossanitários sobre os seus alvos e, posteriormente, afetar a sua absorção e translocação dentro das plantas, facilitando ou dificultado a sua chegada nos órgãos onde deverão exercer seus efeitos (Azevedo, 2007).

Dentre os elementos do clima que podem prejudicar a aplicação dos fungicidas, e devem ser considerados no planejamento das aplicações de defensivos agrícolas, podemse mencionar a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento (Azevedo, 2007). A interação entre esses parâmetros meteorológicos influencia na deposição do defensivo sobre o alvo e também, no potencial de deriva das gotas durante a pulverização (Fritz & Hoffmann, 2008).

Diante do exposto, objetivou-se no presente trabalho analisar o comportamento mensal das variáveis meteorológicas coletadas entre os anos de 2004 a 2017 e determinar, a partir da análise horária dos componentes temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, os horários aptos à aplicação de fungicidas na cultura da soja, utilizando série temporal de dados climáticos do município de Tangará da Serra - Mato Grosso. Tal análise fornecerá subsídios ao planejamento, e à tomada de decisão agrícola, auxiliando na determinação dos horários mais adequados para aplicação na cultura.

### **MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi desenvolvido com dados provenientes da estação meteorológica de observação de superfície automática de Tangará da Serra – Mato Grosso,

geograficamente localizada a uma altitude de 440 m, latitude 14º 39' 0" S e longitude 57º 25' 53" O.

Segundo a classificação de Köppen o clima no município é do tipo "Aw" (clima tropical de savana), que apresenta estação chuvosa no verão (novembro a abril) e estação seca no inverno (maio a outubro), com temperatura média do mês mais frio superior a 18 °C e precipitação do mês mais seco menor que 60 mm (Alvares *et al.*, 2013).

A estação meteorológica está equipada com os sensores conectados a uma unidade de memória central *datalogger* de medição, com medições horárias das seguintes variáveis: radiação solar global a 2 m de altura, velocidade e direção do vento a 10 metros de altura, psicrômetro com abrigo termométrico a 2 m de altura e pluviógrafo a 1,50 m de altura. A base de dados na partição horária foi disponibilizada pela rede de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET.

A definição dos critérios utilizados para as análises das variáveis climáticas foi estabelecida com base nos parâmetros descritos pela Associação Nacional de Defesa Vegetal (ANDEF, 2004) (Tabela 1). Atualmente, estes parâmetros vêm sendo utilizados por diversos autores, como Cunha *et al.* (2008), Cunha *et al.* (2011), Reis *et al.* (2010), Aguiar Junior *et al.* (2011).

**Tabela 1:** Valores de referência das condições meteorológicas ideais parapulverização.

Velocidade do vento	Umidade relativa do ar	Temperatura do ar
$\geq$ 0,83 $\leq$ 2,77 m s <sup>-1</sup>	$\geq 50\%$	≤ 30 °C

Fonte: ANDEF, 2004. Elaborado pela autora

Para análise de variabilidade decendial, foram utilizados os dados horários de temperatura média do ar, umidade relativa média do ar e velocidade do vento média de todos os meses do ano, coletadas no período entre janeiro de 2004 a dezembro de 2017.

A organização das variáveis horárias foi realizada com o software estatístico R, utilizando os pacotes tidyverse (Wickham, 2017), readxl e lubridate (R Core Team, 2018). Com auxílio de planilhas eletrônicas, foi analisada a consistência da base de dados horária e excluídos os períodos em que os sensores não registraram informações. Posteriormente, separou-se em decêndios de cada ano, horas em cada decêndio e valores médios diários dos horários (Santos *et al.*, 2013). O percentual de dados utilizados nas análises decendiais e horárias estão demonstrados na Tabela 2.

As variáveis meteorológicas foram submetidas à análise estatística descritiva para obtenção dos valores médios, mínimos e máximos mensais da temperatura do ar e umidade relativa do ar; média mensal da velocidade do vento e acumulado médio mensal da precipitação.

Variával	Poríodo	Dacândia	Percentual (%)		
		Decenuio	Mínimo	Máximo	
Velocidade do vento média	Decendial	01 ao 36	58,39	86,04	
	Horário	1	59,29	71,43	
Wele side de la securita de dis		34	70,71	82,86	
velocidade do vento media		35	66,43	76,43	
		36	61,69	68,83	
Temperatura do ar média	Decendial	01 ao 36	68,63	97,89	
		1	70,71	80,00	
Temperatura do ar média,	Horário	34	83,57	91,43	
máxima e mínima		35	75,00	86,43	
		36	70,13	79,22	
Umidade relativa do ar média	Decendial	01 ao 36	68,63	97,89	
		1	70,71	80,00	
Umidade relativa do ar média	<b>II</b> / '	34	83,57	91,43	
e mínima	Horario	35	75,00	86,43	
		36	70,13	79,22	

**Tabela 2:** Percentual de dados meteorológicos utilizados nas análises decendiais e horárias das variáveis velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar, disponibilizadas na partição horária, para o período de 2004 a 2017, pelo INMET.

Em relação ao calendário agrícola em Mato Grosso, a semeadura da safra de soja ocorre em outubro e a colheita se encerra na primeira quinzena de abril (CONAB, 2018). Nos decêndios sequenciais 34, 35, 36 (dezembro) e 1 (janeiro), concentram-se as aplicações de fungicidas na cultura, portanto, para esse período foram realizadas as análises de variabilidade horária de temperatura do ar (máxima e média), umidade relativa do ar (mínima e média) e velocidade do vento (média).

Para determinação dos percentuais de frequência de ocorrência de condições climáticas "aptas" e "inaptas" utilizou-se a distribuição de frequência percentual, obtida

pela divisão da frequência absoluta pelo número total de observações de cada condição climática, em que "aptas" corresponde às condições ideais e "inaptas" equivale a valores diferentes dos recomendados (Equação 1).

$$F = \frac{Fa}{N} \times 100$$
 Equação 1

em que: F representa a frequência relativa (%); Fa, a frequência absoluta, que correspondente ao número de observações para uma determinada variável, e a classe de variação; e N é o número total de observações.

A partir dos dados de frequência, foi elaborado um calendário decendial horário para a identificação dos horários com condições meteorológicas favoráveis à aplicação de fungicidas para cada decêndio analisado.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### Análise meteorológica para os anos de 2004 a 2017 em Tangará da Serra -MT

Ao longo do período de 14 anos de dados climáticos analisados, o município de Tangará da Serra apresentou uma variabilidade pluviométrica marcante com duas estações distintas e bem definidas, sendo um período de altas precipitações com 92,06% do volume total compreendendo os meses de outubro a abril, e um período seco compreendendo os meses de junho a agosto, com volume de precipitação em torno de 2,90% (Tabela 3).

As precipitações mensais variaram entre 280,18 e 113,92 mm no período chuvoso, e no período seco ficaram abaixo de 22,05 mm, corroborando os estudos de Martins *et al.* (2010), Dallacort *et al.* (2010) e Dallacort *et al.* (2011), que descreveram precipitações

**Tabela 3:** Estatística descritiva mensal das variáveis climáticas temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento (VV) e precipitação (Prec.) no período de 2004 a 2017, no município de Tangará da Serra -MT.

	Prec. Temperatura do ar		do ar	Umida	VV			
Mês	(mm)		(°C)			(%)		ms <sup>-1</sup>
	Total	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Méd
Janeiro	278,59	25,27	24,66	24,09	85,73	82,91	79,87	2,34
Fevereiro	280,18	24,93	24,35	23,80	86,98	84,32	81,43	2,25
Março	222,76	25,34	24,72	24,15	86,19	83,43	80,43	2,02
Abril	113,92	25,17	24,54	23,95	83,53	80,77	77,81	2,15
Maio	44,44	23,75	23,11	22,50	79,62	76,99	74,25	2,36
Junho	13,65	24,00	23,26	22,54	71,94	69,00	66,04	2,31
Julho	11,24	24,15	23,30	22,47	60,87	57,81	54,83	2,48
Agosto	22,05	26,54	25,61	24,71	49,94	47,03	44,17	2,72
Setembro	36,86	27,34	26,50	25,69	57,64	54,51	51,40	2,63
Outubro	136,76	26,69	25,95	25,25	73,65	70,37	66,97	2,51
Novembro	183,69	26,04	25,38	24,77	80,43	77,35	74,11	2,47
Dezembro	273,03	25,31	24,68	24,10	85,06	82,22	79,14	2,36

Máx: Média da máxima. Méd: Média da média. Mín: Média da mínima.

As temperaturas apresentaram uma variação anual devido à alternância de uma estação úmida e uma estação seca, com temperaturas mais elevadas no final do inverno e início da primavera, particularmente em setembro, mês que antecede a mudança do comportamento hídrico em Mato Grosso (Marcuzzo *et al.*, 2012). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), região de confluência dos ventos alísios de sudeste provenientes do hemisfério Sul, com os de nordeste provenientes do hemisfério Norte,

caracterizada por intensa atividade convectiva, determina o período chuvoso na região (Reboita *et al.*, 2010).

A umidade relativa do ar é definida como a relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver, na mesma temperatura (ponto de saturação) (Queiroz & Costa, 2012). No decorrer do ano, em Tangará da Serra, a umidade relativa média do ar varia entre 47,0 a 84,0%. Por ser proporcionalmente inversa à temperatura, é um fator que delimita a ocorrência de chuvas com maior intensidades (Menezes *et al.*, 2015).

#### Temperatura do ar

As maiores amplitudes térmicas registradas no município de Tangará da Serra (Figura 1), foram observadas nos meses de julho e agosto, nos decêndios 23, 22, 21 e 24, respectivamente. Nesse período as temperaturas médias oscilaram 14,9 °C, com máxima de 32,4 °C no decêndio 23, e mínima de 17,4 °C no decêndio 21.



**Figura 1:** Variabilidade da temperatura média decendial do ar em Tangará da Serra - MT, no período de 2004 a 2017. A linha pontilhada representa o limite máximo recomendado pela ANDEF (2004).

Os meses de seca, entre junho e agosto caracterizam-se por concentrar, em média, menos de 3,0% do volume pluviométrico anual (Martins *et al.*, 2010). Nesses meses do ano, devido aos baixos volumes de precipitação e menor concentração de vapor de água na atmosfera, as trocas de calor com a atmosfera diminuem, resultando em maiores amplitudes térmicas, este fenômeno é frequentemente observado em regiões onde o clima sofre influência da continentalidade (Rocha *et al.*, 2018).

A menor amplitude térmica foi observada no decêndio 5 com mínima de 21,6 °C e máxima de 27,6 °C. Os decêndios 01 a 09 e 34 a 36 apresentaram comportamento semelhante, evidenciando que a amplitude térmica decendial é menor nos meses que concentram maiores volumes de precipitação (dezembro, janeiro, fevereiro e março).

Temperaturas superiores a 30,0 °C, impróprias para realização da aplicação de fungicidas ocorreram no final do inverno e início da primavera, nos decêndios 22 a 30. Houve aumento de 3,3 °C, em média, na temperatura mínima, e observou-se temperatura máxima de 32,9 °C no mês de setembro (decêndio 25), considerado um mês de transição (Martins *et al.*, 2010; Marcuzzo *et al.*, 2012).

A análise da temperatura média horária no decêndio 34 revelou condições impróprias para aplicação às 14:00 horas com variações de 26,5 °C a 30,6 °C, além de temperaturas atípicas às 13:00 e às 15:00 horas (Figura 2**a**). As temperaturas máximas excederam o limite considerado ideal nos horários entre 12:00 e 14:00 horas, com registros atípicos superiores a 30,0 °C no intervalo entre as 14:00 e as 16:00 horas (Figura 2**b**).



**Figura 2:** Temperaturas do ar médias (**a**) e máximas (**b**) horárias no decêndio 34 em Tangará da Serra - MT, no período de 2004 a 2017. A linha pontilhada representa o limite máximo recomendado pela ANDEF (2004).

Para as temperaturas médias no decêndio 35 (Figura 3a), a maior amplitude foi registrada às 14:00 horas, sendo este, o único momento do dia em que a temperatura ultrapassa a faixa de 30,0 °C. Na série de dados de temperaturas máximas, entre as 12:00 e 16:00 horas, há registros de temperaturas superiores a 30,0 °C, especialmente às 13:00 e 14:00 horas, quando concentram-se mais ocorrências de temperaturas impróprias à aplicação (Figura 3b).



**Figura 3:** Temperaturas do ar médias (**a**) e máximas (**b**) horárias no decêndio 35 em Tangará da Serra - MT, no período de 2004 a 2017. A linha pontilhada representa o limite máximo recomendado pela ANDEF (2004).

A série de temperatura do ar média no decêndio 36 não registrou ao longo do dia valores superiores a 30,0 °C (Figura 4a). A variabilidade dos dados horários médios apresentou seu ponto máximo às 14:00 horas, horário com a maior amplitude dos dados. Comparando-se o comportamento da temperatura horária média (Figura 4a) com os valores horários máximos (Figura 4b), o período compreendido entre as 12:00 e as 16:00 horas passa a ser considerado crítico, devido a ocorrência de temperaturas máximas elevadas, com a maior temperatura registrada às 13:00 horas (31,0 °C).



**Figura 4:** Temperaturas do ar médias (**a**) e máximas (**b**) horárias no decêndio 36 em Tangará da Serra - MT, no período de 2004 a 2017. A linha pontilhada representa o limite máximo recomendado pela ANDEF (2004).

No decêndio 1, verifica-se que às 14:00 horas ocorreram temperaturas médias acima de 30,0 °C, com uma amplitude de ~ 2,8 °C (Figura 5a). A série de temperaturas horárias máximas (Figura 5b), demonstra que as ocorrências de temperaturas elevadas críticas incluem os horários das 13:00 às 15:00 horas, com registros atípicos às 16:00 h.



**Figura 5:** Temperaturas do ar médias (**a**) e máximas (**b**) horárias no decêndio 1 em Tangará da Serra - MT, no período de 2004 a 2017. A linha pontilhada representa o limite máximo recomendado pela ANDEF (2004).

Mediante as médias horárias das temperaturas máximas, nota-se que há variações quanto aos horários com mais ocorrências de temperaturas consideradas impróprias para aplicação entre os decêndios, em geral, concentram-se entre 12:00 e 15:00 horas. Observa-se que após as 16:00 horas, com o declínio solar e consequente redução da disponibilidade de radiação solar para o aquecimento do ar, teve início um resfriamento gradativo do ar.

Particularmente, os decêndios 34, 35 e 36 (dezembro), caracterizam-se pela regularidade da precipitação, e, de acordo com Martins *et al.* (2010), a amplitude de

variação dos valores máximos e mínimos de precipitação provável, é menos acentuada em dezembro em comparação ao demais meses. Os resultados descritos por Dallacort *et al.* (2011) reforçam que a ocorrência média mensal de dias chuvosos, com precipitação igual ou superior a 5,1 mm, é maior nos meses de dezembro a março.

As nuvens são um componente atmosférico de grande relevância nos processos de absorção e espalhamento da radiação solar e influenciam a transmissão da radiação solar de ondas curtas através da atmosfera. Na estação chuvosa, a maior presença de nuvens influencia a dissipação da radiação solar direta e, consequentemente, valores menores de irradiação solar (Maciel *et al.*, 2014). Uma vez que essas nuvens tendem a espalhar e refletir a radiação de ondas curtas na atmosfera (Querino *et al.*, 2011).

A intensidade de radiação solar absorvida e refletida, atua nas oscilações de temperatura pela superfície. O aumento da temperatura da superfície aumenta a temperatura do ar imediatamente próximo à ela e, por convecção, aumenta a temperatura do ar nas camadas mais altas (Maciel *et al.*, 2014).

Aplicações em condições de altas temperaturas e ventos acima de 2,77 m s<sup>-1</sup>, podem resultar em volatilização do defensivo, e deriva do produto para locais não alvo. A deriva proveniente da aplicação de defensivos agrícolas gera preocupações, tanto para a sociedade quanto para as indústrias do setor agrícola. O movimento do defensivo agrícola aplicado para fora do alvo, representa uma redução na dosagem sobre o alvo pretendido, tem o potencial de causar danos à outras culturas, além de implicações na saúde humana e danos ambientais (Hoffmann *et al.*, 2011). Estima-se que grande parte dos produtos pulverizados sobre as lavouras sejam perdidos no momento da aplicação (Reis *et al.*, 2010). Porém, não é possível eliminar completamente a deriva em uma aplicação (Bueno *et al.*, 2016). Entre os vários fatores que afetam o comportamento da gota durante a aplicação de produtos pesticidas, as condições ambientais e meteorológicas; temperatura, umidade e velocidade do vento, são os mais importantes (Bueno *et al.*, 2016). Nesse sentido, com o aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar são maiores as chances de evaporação das gotas pulverizadas. O processo de evaporação tanto do solvente, geralmente água, e do soluto, produto químico dissolvido ou em suspensão, é uma problemática que carece de estudos (Heidary *et al.*, 2014).

#### Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar decendial apresentou nos meses mais secos do ano os menores valores (Figura 6). Os meses de transição, maio e setembro, apresentaram valores mínimos de 53,12% e 28,70%, respectivamente, enquanto, nos meses mais úmidos, outubro a abril, observam-se valores acima de 53,12%. Essa variabilidade climática é típica das áreas de Cerrado, as quais possuem apenas duas estações, uma seca e outra chuvosa, esse comportamento assemelha-se ao observado em Diamantino - MT (Dallacort *et al.*, 2010; Rocha *et al.*, 2018) e Ituiutaba -MG (Queiroz & Costa, 2012).



**Figura 6:** Variabilidade da umidade relativa média decendial do ar, em Tangará da Serra - MT, no período de 2004 a 2017. A linha pontilhada representa o limite mínimo recomendado pela ANDEF (2004).

As condições mais severas de umidade relativa do ar, ao longo do ano, foram observadas entre os decêndios 22 e 25. Nesse período, os valores máximos não ultrapassaram 70,0% e os valores mínimos alcançaram 28,11%. O período crítico com baixa umidade relativa do ar, ocorre na estação seca do ano, principalmente no mês de agosto. Nos decêndios que concentram as aplicações de fungicidas na cultura da soja (34, 35, 36 e 01) a mediana e a mínima foram superiores a 85,0% e 64,0%, respectivamente.

A variabilidade horária da umidade relativa do ar mínima, nos decêndios 34, 35, 36 e 01 (Figura 7), demonstrou um comportamento semelhante entre os decêndios analisados. Os maiores valores de umidade relativa do ar ocorreram entre 02:00 e 06:00 horas, e os menores valores às 15:00 horas em todos os decêndios.



**Figura 7**: Umidade relativa do ar mínima horária nos decêndios 34 (**a**), 35 (**b**), 36 (**c**) e 01 (**d**), em Tangará da Serra - MT, no período de 2004 a 2017. A linha pontilhada representa o limite mínimo recomendado pela ANDEF (2004).

#### Velocidade do vento

O vento é um fenômeno complexo, variando em diferentes amplitudes e frequência no tempo e no espaço (Heidary *et al.*, 2014). Dessa forma, em uma pulverização, o vento interfere diretamente na deposição das gotas sobre o alvo, uma vez que gotas pequenas são mais propensas a se afastarem da zona de aplicação. Simultaneamente, gotas menores possibilitam uma melhor cobertura, devido ao maior número de gotas cm<sup>-2</sup>, e à capacidade de penetrar o dossel da cultura. Na Figura 8 é apresentada a variabilidade da velocidade do vento decendial em Tangará da Serra.



**Figura 8:** Variabilidade da velocidade do vento (VV) decendial em Tangará da Serra-MT, no período de 2004 a 2017. As linhas pontilhadas representam os limites máximos e míminos, recomendados pela ANDEF (2004).

O decêndio 28 apresentou a menor dispersão dos dados, enquanto os decêndios 22 e 23 tiveram as maiores amplitudes (~ 2,45 m s<sup>-1</sup>). Em relação às condições climáticas para aplicação, nenhum decêndio da série analisada, apresentou valores de velocidade do vento ideais em todas as observações, mínima de 0,88 m s<sup>-1</sup> e máxima de 2,77 m s<sup>-1</sup>. As

maiores médias decendiais foram registradas entre os decêndios 20 a 26, com ventos acima de 3,0 m s<sup>-1</sup>. Os decêndios 07 e 08 apresentaram as menores médias 2,10 e 2,26 m s<sup>-1</sup>, respectivamente.

Ao se verificar o comportamento horário do vento no decêndio 34 (Figura 9), pode-se perceber maior ocorrência de ventos acima de 2,77 m s<sup>-1</sup> ao longo do dia, em comparação aos demais decêndios, exceto às 6:00 e às 22:00 horas, em que os registros se enquadram no limites de ventos mínimos e máximos recomendados. As maiores amplitudes ocorreram às 14:00 e 15:00 horas.

Para o decêndio 35, os horários impróprios ocorreram no intervalo entre 08:00 e 18:00 e, às 20:00 horas, com a menor dispersão dos dados às 13:00 horas. No período da manhã, entre 09:00 e 11:00 horas a dispersão dos dados foi maior em relação aos demais horários, oscilando entre 2,58 m s<sup>-1</sup> (10:00 horas) e 4,33 m s<sup>-1</sup> (9:00 horas).

No decêndio 36, os horários entre as 07:00 e as 18:00 horas apresentaram valores acima do limite recomendado, e a maior amplitude foi observada no horário das 10:00 horas da manhã. Nos demais horários o vento foi favorável à aplicação, entretanto, devese destacar as ocorrências de ventos atípicos no início da manhã (6:00), e início da noite (20:00 e 21:00 horas). Para o decêndio 01, a ocorrência de ventos além dos limites considerados adequados ocorreu no período entre 07:00 e 21:00 horas, como também nos horários de 05:00 e 23:00 horas.

Para os decêndios 34 e 35 no horário das 12:00 às 14:00 horas, todos os valores foram superiores a 2,77 m s<sup>-1</sup>, e os registros máximos de velocidade do vento ocorreram às 14:00 horas no decêndio 34 com 5,00 m s<sup>-1</sup>, e às 12:00 horas no decêndio 35 com 4,50 m s<sup>-1</sup>. Observa-se que no período entre as 11:00 e 14:00 horas, no decêndio 36, e entre

35
09:00 e 14:00, no decêndio 01, registraram-se valores acima do limite considerado ideal, com ventos máximos de até 4,98 m s<sup>-1</sup>.

Nos horários do dia em que se têm registros de velocidade do vento superior ao limite máximo considerado ideal, observa-se que a mediana excede 2,77 m s<sup>-1</sup> entre as 08: 00 e as 17:00 horas para os decêndios 36, 35 e 01, e entre as 07:00 e as 17:00 horas no decêndio 34.

Os horários nos quais todos os registros da série estão de acordo com os limites ideais para aplicação ocorreram entre às 19:00 e às 06:00 da manhã nos decêndios 35 e 36; as 06:00 e as 22:00 horas no decêndio 34 e 01, incluindo nesse último o intervalo entre 00:00 e 04:00 horas.



**Figura 9:** Velocidade do vento média horária nos decêndios 34 (**a**), 35 (**b**), 36 (**c**) e 1 (**d**), em Tangará da Serra – MT, no período de 2004 a 2017. As linhas pontilhadas representam os limites máximos e míminos recomendados pela ANDEF (2004).

Conforme Cunha *et al.* (2008), a eficiência do controle químico depende, entre outros fatores, da cobertura do alvo, especialmente no terço inferior das plantas, local crítico para o controle da ferrugem, portanto, em condições climáticas desfavoráveis, com vento acentuado, as gotas menores são mais susceptíveis à deriva e, consequentemente, menor deposição.

O vento interfere e influencia na movimentação e deposição das gotas sobre o alvo biológico (Boller *et al.*, 2007). Costa *et al.* (2007) em ensaios a campo com herbicidas demonstraram haver uma relação linear entre deriva e velocidade de vento, onde ventos acima de 3,89 m s<sup>-1</sup>, possibilitaram que maior quantidade de gotas não atingisse o alvo. Diferentes condições meteorológicas nas aplicações terrestres de herbicidas demonstraram que o alcance das gotas pulverizadas, pode chegar até 150 m além do alvo (Carlsen *et al.*, 2006). Segundo os autores, a deriva aumentou entre 5 a 7 vezes com o aumento da velocidade do vento de 2,0 m s<sup>-1</sup> para 4,8 m s<sup>-1</sup>. Na Figura 10 são apresentadas as frequências de ocorrência horária de condições meteorológicas "aptas" para a aplicação de fungicidas na cultura da soja.



#### Horário

**Figura 10:** Frequência horária (FH, %) de ocorrências de condições meteorológicas "aptas" para aplicações de fungicidas na cultura da soja nos decêndios 1 (DEC 1); 34 (DEC 34); 35 (DEC 35) e 36 (DEC 36), em Tangará da Serra - MT, nos anos de 2004 a 2017.

Ambos os decêndios apresentaram comportamento semelhante quanto à variabilidade das variáveis horárias. Entre 41,55 e 54,55% dos registros horários apresentaram condições climáticas ótimas para temperatura do ar e velocidade do vento entre 05:00 e 07:00 horas da

manhã. A velocidade do vento abaixo do ideal é o principal evento que torna esse período inapto para aplicação, especialmente nos decêndios 01 e 36, onde, respectivamente, 38,49 e 35,65% das observações apresentaram velocidade do vento inferior a 0,83 ms<sup>-1</sup>. Nos demais decêndios, as frequências de condições de ventos desfavoráveis para aplicação foram de 21,31% (DEC 35) e 27,72% (DEC 34) de registros acima de 2,77 m s<sup>-1</sup>.

No horário entre 8 e 10 horas as frequências de condições ideais foram, em média, de 32,21% (DEC 34), 27,60% (DEC 35), 23,04% (DEC 36) e 24,76% (DEC 1). Em média 73,10% dos eventos foram classificados como inaptos nesse período. Nos decêndios 01 e 36, aproximadamente 30% das ocorrências tiveram ventos inferiores a 0,83 m s<sup>-1</sup>; já nos decêndios 34 e 35, os percentuais foram de 12,99 e 25,76%, respectivamente. A maior interferência nesses horários, de modo geral, é representada pelos ventos acima de 2,77 m s<sup>-1</sup> (entre 37,32% e 53,54%). A partir desse horário a ocorrência de clima apto à aplicação é decrescente e, com a maior incidência de radiação solar na superfície, a temperatura também passa a ser limitante para a operação, com frequências "aptas" inferiores a 10% às 13:00 horas.

Entre 11:00 e 17:00 horas, as frequências de temperaturas elevadas combinadas com ventos baixos oscilaram entre 9,09 a 37,21%, já as ocorrências de temperaturas e ventos altos corresponderam, em média a 10,0%. A partir das 19:00 horas, com o resfriamento da superfície, a temperatura deixou de ser um fator limitante e as condições climáticas aptas ficaram próximas a 50,0%, o que possibilita, em determinados horários, as aplicações no período noturno. Entretanto, a velocidade do vento ainda é um fator limitante para a qualidade da operação.

Conforme Santos *et al.* (2013), em condições de campo é difícil o controle de todas das variáveis que influenciam na qualidade da aplicação, assim como também é complicado somente realizar a aplicação quando todos os parâmetros climáticos estiverem sob controle.

Nesse sentido, a tecnologia de aplicação é uma ferramenta que busca tornar o processo mais eficiente, com a utilização de pontas com indução de ar, juntamente com o emprego de tamanho de gota adequado às condições climáticas no momento da aplicação. A utilização de adjuvantes visando modificar as propriedades físicas dos defensivos, por meio da alteração dos parâmetros de coeficiente de tensão superficial e viscosidade, reflete no tamanho das gotas de pulverização, com consequência direta na deriva (Heidary *et al.*, 2014).

A correta deposição do produto sobre o alvo reflete no sucesso da aplicação, dessa forma, recomenda-se que o fungicida selecionado, sendo de ação de contato, ou tendo ação sistêmica, seja posicionado no alvo, no momento correto e de forma adequada (Cunha *et al.*, 2011). A cobertura do alvo de forma desuniforme propicia baixa eficácia no controle de doenças, principalmente no caso de fungicidas de contato, que requerem cobertura uniforme de toda a planta (Reis *et al.*, 2010).

O comportamento, a distribuição e a deposição das gotas são diretamente influenciadas pelo seu tamanho. A redução do volume de calda nas pulverizações tem exigido a utilização de gotas menores para uma melhor cobertura. Desse modo, à medida que o tamanho de gota aumenta as perdas por deriva diminuem, uma vez que estão menos propensas ao deslocamento pelo vento (Bueno *et al.*, 2016).

Uma das alternativas consiste na utilização de pontas com indução de ar que produzem gotas aeradas que, em comparação a gotas sólidas, são menos propensas a deriva por sofrerem menor influência do vento e da alta temperatura (Cunha *et al.*, 2011). A recomendação é que em condições climáticas desfavoráveis se evite produzir gotas "muito finas" (< 100  $\mu$ m), observando ainda, as orientações especificas de cada ponta de pulverização frente à necessidade do tratamento em questão, e o grau de risco de deriva na aplicação (ANDEF, 2004).

### CONCLUSÕES

Em Tangará da Serra- MT a umidade relativa do ar não é um fator limitante para a aplicação de fungicidas na cultura da soja.

A temperatura do ar elevada e a velocidade do vento média acima do recomendado, propiciam condições meteorológicas inadequadas entre 11:00 e 16:00 horas.

As condições meteorológicas "aptas" concentram-se nas primeiras horas do dia, entre 5:00 e 7:00 horas, e a partir das 19:00 horas. Porém, para a aplicação noturna a velocidade do vento ainda é um fator limitante para a qualidade da operação.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Aguiar Junior HO, Raetano CG, Prado EP, Dal Pogetto MHFA, Chistovam RS & Gimenes MJ (2011). Adjuvantes e assistência de ar em pulverizador de barras sobre a deposição da calda e controle de *Phakopsora pachyrhizi* (Sydow & Sydow). Summa Phytopathologica, 37:103-109.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves LM & Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22:711-728.

ANDEF - Associação Nacional De Defesa Vegetal (2004) Manual de tecnologia de aplicação. Campinas, ANDEF, 78p. Disponível em:< http://www.esalq.usp.br/cprural/fli pbook/pb/pb61/assets/basic-html/page2.html>

Azevedo LAS (2007). Fungicidas sistêmicos - Teoria e prática. Campinas: EMOPI, 2007, 284p.

Boller W, Forcelini CA & Hoffmann LL (2007) Tecnologia de aplicação de fungicidas - parte I. Revisão Anual de Patologia de Plantas, 15:243-276.

Bueno MR, Cunha JPAR & Santana DG (2016) Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops. Biosystems Engineering, 30:1:11.

Carlsen SCK, Spliid NH & Svensmark B (2006) Drift of 10 herbicides after tractor spray application. 2. Primary drift (droplet drift). Chemosphere, 64:778-786.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2018) Levantamentos de safra. Disponível em:< https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-degraos/item/download/21088\_8ca248b277426bb3974f74efa00abab6>.

Costa AGF, Velini ED, Negrisoli E, Carbonari CA, Rossi CVS, Corrêa MR & Silva FML (2007) Efeito da intensidade do vento, da pressão e de pontas de pulverização na deriva de aplicações de herbicidas em pré-emergência. Planta Daninha, 25:203-210.

Cunha JPAR, Eudes AC, Moura JLSJ, Zago FA & Juliatti FC (2008) Efeito de pontas de pulverização no controle químico da ferrugem da soja. Engenharia Agrícola Jaboticabal, 28:283-291.

Cunha JPAR, Farnese AC, Olivet JJ & Villalba J (2011) Deposição de calda pulverizada na cultura da soja promovida pela aplicação aérea e terrestre. Engenharia Agrícola Jaboticabal, 31:343-351.

Dallacort R, Martins JA, Inoue MH, Freitas PSL & Coletti AJ (2011) Distribuição das chuvas no município de Tangará da Serra, médio norte do Estado de Mato Grosso, Brasil. Acta Scientiarum Agronomy, 33:193-200.

Dallacort R, Martins JA, Inoue MH, Freitas PSL & Krause W (2010) Aptidão agroclimática do pinhão-manso na região de Tangará da Serra, MT. Revista Ciência Agronômica, 41:375-377.

Ferreira DBS, Souza EB & Moraes BC (2013) Ciclo horário da precipitação no leste da Amazônia durante o período chuvoso. Revista Brasileira de Climatologia, 13:74-86.

Fritz BK & Hoffmann WC (2008) Atmospheric Effects on Fate of Aerially Applied Agricultural Sprays. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 10:1-15.

Heidary MA, Douzals JP, Sinfort C & Vallet A (2014) Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review. Crop Protection, 63:120-130.

Hoffmann WC, Fritz BK & Martin DE (2011) Air and Spray Mixture Temperature Effects on Atomization. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal. Manuscript, 13:1-8.

Maciel CR, Luz VS, Santos FM, Nogueira MCJA & Nogueira JS (2014) Interação das variáveis microclimáticas e cobertura do solo em região urbana e limítrofe-urbana na cidade de Cuiabá/ MT. Caminhos de Geografia, 15:199-215.

Marcuzzo FFN, Melo DCR & Rocha HM (2012) Distribuição Espaço-Temporal e Sazonalidade das Chuvas no Estado do Mato Grosso. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 16:157-167.

Martins JA, Dallacort R, Inoue MH, Santi A, Kolling EM & Coletti AJ (2010) Probabilidade de precipitação para a microrregião de Tangará da Serra, Estado Do Mato Grosso. Pesquisa Agropecuária Tropical, 40:291-296.

Menezes HEA, Medeiros RM, Santos JLG & Lima TS (2015) Variabilidade climática para o município de Patos, Paraíba, Brasil. Revista Verde, 10:37-41.

Moreira PSP, Dallacort R, Galvanin EAP, Neves RJ, Carvalho MAC & Barbieri JD (2015) Ciclo diário de variáveis meteorológicas nos biomas do Estado de Mato Grosso. Revista Brasileira de Climatologia, 17:173-188.

Oliveira JRT & Padovani CR (2017) Análise da inter-relação da produtividade agrícola e característica climática na região sudeste do Estado de Mato Grosso, por técnicas multivariadas. Engineering and Science, 2:2-12.

Queiroz AT & Costa RA (2012) Caracterização e variabilidade climática em séries de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação em Ituiutaba – MG. Caminhos de Geografia, 13:346-357.

Querino, CAS, Moura MAL, Querino JKAS, Von Radow C & Marques Filho (2011) Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (kt), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoas – Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, 26:204-294.

R Core Team. R (2018) A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em:< https://www.R-project.org/>.

Reboita MS, Gan MA, Rocha RP & Ambrizzi T (2010) Regimes De Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. Revista Brasileira de Meteorologia, 25: 185-204.

Reis EF, Queiroz DM, Cunha JPAR & Alves SMF (2010) Qualidade da aplicação aérea líquida com uma aeronave agrícola experimental na cultura da soja (*Glycine max l.*) Engenharia Agrícola Jaboticabal, 30: 958-966.

Rocha AA, Novais JWZ, Souza RD, Santos ARC & Aleixes VF (2018) Caracterização da variabilidade climática em Diamantino/MT - Brasil no período de 1987 a 2017. Enciclopédia Biosfera, 15:69-80.

Santos RB, Souza AP, Silva AC, Almeida FT, Arantes KR & Siqueira JL (2013) Planejamento da pulverização de fungicidas em função das variáveis meteorológicas na região de Sinop – MT. Global Science and Techonology, 06:72-87.

Souza AP, Mota LL, Zamadei T, Martim CC, Almeira FT & Paulino J (2013) Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. Nativa, 1:34–43.

Hadley Wickham (2017). tidyverse: Easily Install and Load the 'Tidyverse'. R package version 1.2.1. https://CRAN.R-project.org/package=tidyverse.

## **ARTIGO II**

### MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL COM SEBAL NA CULTURA

## DO ALGODÃO EM ÁREA AGRÍCOLA DO CERRADO

# MODELING OF REAL EVAPOTRANSPIRATION WITH SEBAL IN COTTON CROP IN THE CERRADO AGRICULTURAL AREA

(Agricultural water management)

#### RESUMO

Na agricultura, o sensoriamento remoto (SR) tem possibilitado pesquisas em extensas áreas através de modelagem, otimizando recursos e tempo. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi estimar, por meio do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), a evapotranspiração real (ETr) e os parâmetros biofísicos em áreas de cultivo de algodão no Cerrado, utilizando imagens de satélite Landsat 8, assim como determinar o coeficiente de cultivo (Kc) para as cultivares TMG 43 WS e FM 940 GLT. Foram utilizados dados meteorológicos, provenientes de estação automática, e dados de campo coletados na Fazenda, referentes ao ano de 2015. As cenas utilizadas corresponderam as fases I, III e IV de desenvolvimento da cultura, respectivamente. Para análise dos parâmetros estimados, ETr, Saldo de radiação (Rn), albedo, temperatura da superfície, fluxos de calor sensível (LE), latente (H) e no solo (G), Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Área Foliar (IAF), foram selecionados, para cada cultivar, duas amostras com 1726 pixels cada. O NDVI e o IAF foram bons indicadores do desenvolvimento do algodoeiro em ambas as cultivares. A variabilidade dos parâmetros biofísicos albedo e temperatura da superfície apresentaram valores compatíveis com as fases de desenvolvimento da cultura. O particionamento de energia foi semelhante entre as áreas para uma mesma cultivar. Os percentuais do Rn convertidos em LE ficaram entre 51,74% (TMG 43 WS) e 31,63% (FM 940 GLT) em 03/02; e acima de 83,0% em 26 de maio, em ambas as cultivares. A ETr na fase inicial (03/02) foi maior nas áreas com TMG 43 WS (2,81 e 3,01 mm dia-1). Na fase de máxima cobertura do solo (26/05), a ETr média foi semelhante entre as cultivares (3,3 mm dia<sup>-1</sup>). No final do ciclo, a ETr média foi de 2,0 mm dia<sup>-1</sup> nas áreas com TMG 43 WS, e de 1,72 mm dia<sup>-1</sup> nas áreas com FM 940 GLT. A ETr obtida com o SEBAL diferiu da metodologia padrão recomendada pela FAO, com erro quadrático médio de 1,41 mm dia<sup>-1</sup> (TMG 43 WS), e 1,53 mm dia<sup>-1</sup> (FM 940 GLT). Os valores do coeficiente de cultivo do algodão na fase I, foram de 0,60 e 0,64 (TMG 43 WS); 0,30 e 0,44 (FM 940 GLT); na fase III, 0,90 e 0,89 (TMG 43 WS); 0,88 e 0.87 (FM 940 GLT); na fase IV 0.35 e 0.38 (TMG 43 WS); 0.33 e 0.31 (FM 940 GLT).

Palavras chaves: sensoriamento remoto; balanço de energia; Landsat 8.

## ABSTRACT

In agriculture, remote sensing (RS) has enabled research in large areas through modeling, optimizing resources and time. In this context, the objective of this work was to estimate, through the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) algorithm, the real evapotranspiration (ETr) and biophysical parameters in cotton cultivation areas in Cerrado, using Landsat 8 satellite imagery, as well as determining the cultivation coefficient (Kc) for the cultivars TMG 43 WS and FM 940 GLT. Meteorological data from an automatic station and field data collected at the farm for 2015 were used. The scenes used corresponded to phases I, III and IV of crop development, respectively. For analysis of the estimated parameters, ETr, Radiation Balance (Rn), albedo, surface temperature, sensible heat fluxes (LE), latent (H) and ground (G), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Leaf Area Index (LAI), two samples with 1726 pixels each were selected for each cultivar. NDVI and LAI were good indicators of cotton development in both cultivars. The variability of albedo biophysical parameters and surface temperature presented values compatible with the stages of culture development. Energy partitioning was similar between areas for the same cultivar. The percentages of Rn converted to LE were between 51.74% (TMG 43 WS) and 31.63% (FM 940 GLT) on 02/03; and above 83.0% on May 26 in both cultivars. The ETr in the initial phase (02/03) was higher in the areas with TMG 43 WS (2.81 and 3.01 mm day<sup>-1</sup>). In the maximum soil cover phase (05/26), the average ETr was similar among cultivars (3.3 mm day<sup>-1</sup>). At the end of the cycle, the average ETr was 2.0 mm day<sup>-1</sup> in areas with TMG 43 WS, and 1.72 mm day<sup>-1</sup> in areas with FM 940 GLT. The ETr obtained with SEBAL differed from the standard methodology recommended by FAO, with mean square error of 1.41 mm day<sup>-1</sup> (TMG 43 WS) and 1.53 mm day<sup>-1</sup> (FM 940 GLT). The values of the cotton crop coefficient in phase I were 0.60 and 0.64 (TMG 43 WS); 0.30 and 0.44 (FM 940 GLT); in phase III, 0.90 and 0.89 (TMG 43 WS); 0.88 and 0.87 (FM 940 GLT); in phase IV 0.35 and 0.38 (TMG 43 WS); 0.33 and 0.31 (FM 940 GLT).

Keywords: remote sensing; energy balance; Landsat 8.

## INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é uma das principais variáveis em muitos modelos hidrológicos, ecossistêmicos e de superfície terrestre (Bhattarai et al., 2016). Constitui um componente fundamental do balanço hídrico em escala global e local e, na agricultura, representa a quantidade de água que deve ser aplicada nas culturas através da irrigação (Elnmer et al., 2019). As estimativas em escalas de campo podem auxiliar no gerenciamento do uso da água na agricultura, otimizando a aplicação dos recursos limitados de água doce (Cammalleri et al., 2014).

A quantificação dos fluxos de energia e da evapotranspiração nos trópicos e sua variação entre as paisagens é de fundamental importância para a avaliação dos

ciclos hídricos, compreensão das interações solo-planta-atmosfera e melhoria dos modelos climáticos globais e regionais (Biudes et al., 2015).

Nos últimos anos, diversas metodologias têm sido desenvolvidas para fornecer dados hidrológicos em áreas agrícolas extensas a partir de imagens espectrais. O objetivo de tais metodologias são estimar os fluxos de calor latente (LE) e a evapotranspiração real (ETr) em escalas locais e regionais, utilizando detecção remota e dados meteorológicos complementares (Ruhoff et al., 2012).

A detecção remota é uma ferramenta que permitiu grandes avanços nos estudos de recursos hídricos e entendimento de como esses são afetados por áreas com diferentes tipos de cobertura do solo (Silva et al., 2012; Silva et al., 2013). O sensoriamento remoto (SR) oferece amplas possibilidades de aplicações em áreas agrícolas, particularmente nas análises da vegetação, no entanto, requer, em alguns casos, a validação das informações com dados de campo (Furlanetto e Silva, 2017). As estimativas da ETr, por meio do sensoriamento remoto, têm como vantagens a economia de tempo e de recursos (Kamali e Nazari, 2018).

Entre os algoritmos desenvolvidos para tais estimativas está o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (Bastiaanssen, 1995), que possibilita a estimativa da ETr e do balanço de energia na superfície e, adicionalmente, são obtidos os parâmetros biofísicos albedo e temperatura da superfície. O modelo também permite calcular os índices de vegetação IAF (Índice de Área Foliar), NDVI (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada) e SAVI (Índice de Vegetação Ajustado Ao Solo), os quais, segundo Santos et al. (2017), são indicadores da condição da vegetação e da umidade do solo, e podem ser utilizados para avaliar os níveis de stress hídrico em sistemas agrícolas. O SEBAL não se restringe ao uso em áreas irrigadas e pode ser aplicado a uma ampla gama de biomas (Ruhoff et al., 2012).

A ETr varia em função dos fatores relativos ao clima, disponibilidade de água no solo, como também por aspectos relacionados a cultura, como fase de crescimento, área de cobertura do solo e vigor da planta (Alam et al., 2017). A detecção remota da ET é uma técnica de medição indireta que envolve o uso de um conjunto de equações numa sequência hierárquica rigorosa para converter as radiâncias espectrais medidas por satélites em estimativas de ETr (Bastiaanssen et al., 2005). A literatura demonstra que os resultados obtidos com o SEBAL têm sido consistentes com as medições de campo (Dantas et al., 2015; Machado et al., 2014; Pavão et al., 2015; Tang et al., 2013). Essas estimativas podem ser validadas através da evapotranspiração de referência (ETo), que representa a demanda evaporativa local, e do coeficiente da cultura (Kc), tabelado para as diversas fases de desenvolvimento da planta. A ETo pode ser calculada pelo modelo descrito por Allen et al. (1998), pela equação de Penman-Monteith FAO 56, e a ETr quantificada pelo Kc referente ao período do ciclo da cultura.

Tem-se demonstrado que o nível de ETr está relacionado com a demanda evaporativa do ar. Essa demanda pode ser expressa como a evapotranspiração de referência (ETo) que, quando calculada prediz o efeito do clima sobre o nível de evapotranspiração da cultura. O valor do Kc varia com a cultura e com seu estágio de desenvolvimento. Para a maioria das culturas, o valor de Kc aumenta a partir de um pequeno valor no momento da emergência até um máximo no período em que é alcançado seu pleno desenvolvimento e diminui à medida que ocorre a maturação (Doorenbos e Kassam, 1994). A partir das estimativas de ETr, quando a disponibilidade de água não causa limitações para o crescimento da planta, é possível conhecer a necessidade hídrica da cultura em cada fase de desenvolvimento através do seu coeficiente de cultivo (Kc) (Kamali e Nazari, 2018).

Nesse sentido, os experimentos de longa duração são essenciais para melhor compreensão das variações sazonais e interanuais em particionamento de energia e consumo de água pelas culturas. A cotonicultura ocupa lugar de destaque entre as comodities agrícolas no Estado e, atualmente, Mato Grosso lidera a produção de algodão no país, respondendo por 66,9% da produção nacional na safra 2018/2019 (CONAB, 2019).

Diamantino - MT se destaca entre os municípios produtores respondendo por aproximadamente 5% da produção estadual, equivalente a 227.588 toneladas (CONAB, 2019; IBGE, 2018). No entanto, ainda são escassas as informações sobre as trocas de energia e evapotranspiração em áreas com predominância desta atividade agrícola no Estado de Mato Grosso, principalmente em experimentos de escala regional.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo estimar e analisar a dinâmica espaço-temporal da evapotranspiração real e dos parâmetros biofísicos

obtidos por sensoriamento remoto, utilizando imagens do satélite Landsat 8 por meio do algoritmo SEBAL em área de cultivo de algodão no Cerrado, assim como determinar o coeficiente de cultivo (Kc) para duas cultivares comerciais de algodão e a eficiência do uso da água pela cultura. Por fim, buscou-se validar os dados estimados por meio do SEBAL com o modelo Penman-Monteith FAO 56.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

## Área de estudo

O local da pesquisa foi a Fazenda Paiaguás, do grupo SLC Agrícola S.A., situada no território do município de Diamantino-MT, geograficamente localizada na latitude 14° 04' 28" S e longitude 57° 26' 55" O, com altitude de 617 metros (Figura 1). A região apresenta um clima "Aw" (clima tropical de savana), com inverno seco e verão chuvoso, características estas típicas do Bioma Cerrado (Alvares et al., 2013).



**Figura 1.** Recortes das áreas utilizadas para análise do algoritmo SEBAL na Fazenda Paiaguás, Diamantino – MT. Data da imagem 03/02/2015.

O regime pluviométrico na região apresenta variações sazonais e precipitação pluvial média anual de 1793 mm, com cerca de 88% desse volume concentrado entre os meses de outubro a abril, e apenas 12% nos meses de maio a setembro. A temperatura média anual é de 24,97 °C, sendo julho o mês mais frio (22,44 °C) e outubro o mês mais quente (26,37 °C) (Souza et al., 2013).

O solo da região é caracterizado como Latossolo Vermelho Distroférrico de textura argilosa (entre 56% e 70% de argila) (Santos et al., 2018). O período de semeadura do algodão na região ocorre entre os dias 01 de dezembro a 31 de janeiro, devido ao menor risco climático nesse período para a cultura (MAPA, 2018).

#### Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados para a estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração real foram fornecidos pelo Laboratório de Meteorologia e Climatologia Agrícola da UNEMAT, obtidos a partir de uma Estação Meteorológica Automática (EMA), instalada no campo experimental da fazenda entre os anos de 2014 e 2016, equipada com sensores de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) (CS215), instalado a 2 m da superfície, velocidade do vento a 2 m (m s<sup>-1</sup>) (03002-R.M), precipitação pluvial (mm) (TB4 rain gauge) e radiação solar global incidente (W m<sup>-2</sup>) (piranômetro CMP3). Esses elementos foram registrados continuamente em um sistema *datalogger* (CR1000) que armazenou as informações geradas a cada 30 segundo, com valores médios calculados a cada 10 minutos (Campbell Scientific INC., USA).

#### Imagens de satélite

A estimativa do saldo de radiação e da evapotranspiração real foram realizadas a partir de imagens geradas pelos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), que se encontram a bordo do satélite Landsat 8, com resolução temporal de 16 dias e espacial de 30 x 30 m nas bandas refletivas 1 a 7 e 100 x 100 m nas bandas termais 10 e 11 (NASA, 2014).

A seleção das imagens foi realizada considerando os critérios de mínima cobertura de nuvens, cobertura espacial da área de estudo e a distribuição temporal

que possibilitasse estudar os diferentes períodos do ano, tal como a sazonalidade do clima e diferentes fases fenológicas da cultura, resultando em três cenas selecionadas entre as quatorze disponíveis. As imagens utilizadas para a implementação do algoritmo SEBAL foram adquiridas da *United States Geological Survey* (USGS) no portal *Earth Explorer*, correspondente a órbita/ponto 227/70, dos dias 03 de fevereiro de 2015, 26 de maio de 2015 e 14 de agosto de 2015.

Para a análise dos parâmetros obtidos com o SEBAL foram utilizadas quatro amostras sobre a área de estudo (Figura 1). A escolha dos talhões levou em conta o tamanho da área cultivada e a característica de uso do solo. Foram selecionados os talhões cultivados com uma única cultivar de algodão, com área superior a 2.000.000 m<sup>2</sup> (200 hectares), onde a cobertura do solo fosse constituída pela cultura do algodão nas três datas analisadas. Definidos esses talhões, um recorte foi realizado e as áreas padronizadas com 1.500.000 m<sup>2</sup> (150 hectares), correspondendo a uma amostra de 1726 pixels em cada talhão. Na Tabela 1 constam as datas de semeadura, emergência, colheita, descrição das variedades, ciclo e a população de plantas nos talhões analisados.

**Tabela 1.** Descrição das variedades e população de plantas por hectare (**mil pl. ha**) nas áreas analisadas, datas de semeadura, emergência e colheita do algodão, Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.

Ároo	Variadada	População		Ciclo		
Area	vaneuaue	mil pl. ha	Semeadura	Emergência	Colheita	(dias)
А	TMG 43 WS*	111.944	31/01/15	05/02/15	25/08/15	206
В	TMG 43 WS	110.972	27/01/15	01/02/15	26/08/15	211
С	FM 940 GLT	93.333	20/01/15	24/01/15	24/08/15	216
D	FM 940 GLT**	81.388	16/01/15	21/01/15	18/08/15	214

\*Tecnologia Wide Strike®

\*\* Tecnologia Twinlink Glytol Liberty Link®

## Implementação do Algoritmo SEBAL

O processamento digital das imagens de satélite foi executado com o software ERDAS Imagine<sup>®</sup> (versão 2011) e as operações matemáticas intra e inter bandas espectrais com a ferramenta *Model Maker*. Inicialmente as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do sensor OLI (*Operational Land Imager*) e a banda 10 do sensor TIRS (*Thermal Infrared* 

Sensor) foram empilhadas, formando um único arquivo de imagem. Um mesmo recorte da área de interesse foi mantido para todas as imagens, com as seguintes coordenadas mapa: canto superior esquerdo (4438,50); canto superior direito (4668,30); canto inferior esquerdo (-1441310,0) e canto inferior direito (-1564740,0). Para elaboração das cartas temáticas utilizou-se o software ArcGis (versão 2010), sendo as imagens processadas em projeção geográfica, datum Sirgas 2000.

Para determinação do saldo de radiação à superfície, seguiu-se os procedimentos do algoritmo SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Allen et al., 2002) conforme o fluxograma apresentado na Figura 2. Para o saldo de radiação (Rn), que representa a radiação disponível à superfície, são consideradas tanto a radiação de onda longa quanto a radiação de onda curta.



**Figura 2.** Fluxograma metodológico para o cálculo do saldo de radiação. Fonte: Allen et al., 2002

Na Tabela 2 são descritas as equações dos modelos matemáticos para realização de cada etapa.

 Tabela 2. Modelos matemáticos utilizados para determinação do saldo de radiação.

-	-	-						
Etapa	Equação							
<b>Etapa 1:</b> Calibração Radiométrica ( $L_{\lambda}$ )	$L_{\lambda}=M_{L}+Q_{cal}+A_{L}$	Eq. (1)						
ML e AL são fatores de redimensionamento multiplication	M <sub>L</sub> e A <sub>L</sub> são fatores de redimensionamento multiplicativo e aditivo, respectivamente,							
para cada banda específica (ambos os fatores são forr	necidos no arquivo me	tadados						
e são adimensionais); Q <sub>cal</sub> são os valores de pixel	l calibrados padroniz	ados ou						
números digitais (ND). As unidades de radiância espe	ectral (L <sub>λ</sub> ) são W m <sup>-2</sup> s	r⁻¹ µm⁻¹.						
<b>Etapa 2a:</b> Reflectância ( $\rho_{\lambda}$ )	$\alpha = M \Omega + A$	$E_{\alpha}(2)$						
(sem correção do ângulo solar).	$P_{\lambda} = M_p Q_{cal} + A_p$	Ey. (2)						
$M_{\rho}$ e $A_{\rho}$ são fatores de redimensionamento multiplicati	vo e aditivo, respectiv	amente,						
para cada banda específica (constantes adimensi	onais fornecidos no	arquivo						
metadados (M_p=-0,1; A_p=2E^{-5}); Q_{cal} são os valores de	pixel calibrados padro	onizados						
ou números digitais (ND).								
<b>Etapa 2b:</b> Reflectância (ρλ)	ολολ	Eq. (3)						
(correção do ângulo solar)	$\theta_{N}^{PN}$ sen ( $\theta_{SE}$ )	Lq. (J)						
$\rho_{\lambda}$ é a reflectância sem correção do ângulo solar; $\theta_{S}$	⊯ é o ângulo azimuta	al, que é						
calculado segundo a fórmula a seguir								
	$\theta_{SE}$ =90- $\theta_{SZ}$	Eq. (4)						
Em que: $\theta_{SZ}$ é o ângulo de elevação solar obtido no m	netadados.							
<b>Etapa 3:</b> Albedo topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ )	$\alpha_{toa} = \Sigma \left( \omega_{\lambda} \times \rho_{\lambda} \right)$	Eq. (5)						
Em que $\omega_{\lambda}$ é o coeficiente de ponderação para cada l	banda,							
$\rho_{\lambda}$ são reflectâncias para cada banda	$\omega_{\lambda} = \frac{\text{ESUN}_{\lambda}}{\sum \text{ESUN}_{\lambda}}$	Eq. (6)						
ESOL são as irradiâncias espectrais exoatmosféricas solares.								
<b>Etapa 4:</b> Albedo da superfície (α)	$\alpha = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{atm}}}{T_{\text{SW}}^2}$	Eq. (7)						
$\alpha_{atm}$ é a reflectância da própria atmosfera (0,03); $\alpha_{toa}$ é o albedo do topo da								
atmosfera, $\tau_{SW}$ é a transmissividade atmosférica para condições de céu claro.								

#### continuação

 $\tau_{SW}$  pode ser obtida por:

$$\tau_{SW} = 0.35 + 0.627 \exp\left[\frac{-0.00146P}{K_t \cos\theta_{hor}} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos\theta_{hor}}\right)^{0.4}\right] = Eq. (8)$$

em que  $\theta_{hor}$  é o ângulo zenital solar, obtido; P é a pressão atmosférica média em kPa; kt é o coeficiente de turbidez da atmosfera (kt = 1 para céu claro e kt = 0,5 para turbidez extrema)

W pode ser obtida pela equação	proposta	Eq. (0)
por Garrison e Adler (1990):	$VV = 0, 14 e_a r_{air} + 2, 1$	⊏q. (9)
Etapa 5: Índices de vegetação	NDVI = $(\rho_V - \rho_{IV}) / (\rho_V + \rho_{IV})$	
	SAVI = (1+L) $(\rho_V - \rho_{V}) / (L + \rho_V + \rho_{V})$	Eq. (10)
NDVI. IAF. SAVI	. (0.69- SAVI)	Eq. (11)
	$\ln\left(\frac{-9.59}{0.59}\right)$	Eq. (12)
	0,91	

pv e piv, correspondem a reflectâncias das bandas 5 e 4; L é uma variável de valor 0,25 para vegetação densa, 0,5 em vegetação intermediária e 1,0 para pouca vegetação.

Para pixels com IAF  $\ge$  3  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0.98$  e para corpos de água (NDVI < 0)  $\epsilon_{NB} = 0.99$  $\epsilon_0 = 0.985$  (Allen et al.,2002).

**Etapa 7a**: Temperatura de brilho (T<sub>b</sub>)  
$$T_{b} = \frac{K_{2}}{\ln\left(\frac{K_{1}}{L_{\lambda}} + 1\right)} \qquad \text{Eq. (15)}$$

 $K_1 = 774,89 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu^{-1} \text{ e } K_2 = 1321,08 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu^{-1} \text{ são as constantes de calibração}$ da banda termal 10.  $L_{\lambda}$  é a radiância espectral da banda 10.

**Etapa 7b:** Temperatura de superfície (T<sub>s</sub>)  $T_{s} = \frac{T_{b}}{1 + \left(\frac{\lambda^{*}T_{b}}{\rho}\right) \ln_{\epsilon}} \quad Eq. (16)$ 

 $p=h^*c /\sigma$  em que: h e σ são constantes de Planck e Stefan-Boltzman respectivamente, com valores de 16,626x10<sup>-34</sup> Js e 1,38x10<sup>-23</sup> J.K<sup>-1</sup> e c é valor da velocidade da luz, 2,998x10<sup>8</sup> m.s<sup>-1</sup>. T<sub>b</sub> é temperatura de brilho; λ é comprimento de onda da radiação emitida, 10,8 μm para banda 10 do Landsat 8. ε é a emissividade da superfície. **Etapa 8:** Radiação de onda longa emitida (R<sub>L↑</sub>)  $R_{L↑} = \epsilon_0 . \sigma . T_S^4$  Eq. (17)  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada *pixel*,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e Ts é temperatura de superfície (K).

**Etapa 9:** Radiação de onda curta incidente  $(R_{C\downarrow})$   $R_{C\downarrow}$ = S. cos Zd<sub>r</sub> .T<sub>SW</sub> Eq. (18) S é a constante solar (1367 W m<sup>-2</sup>), Z é o ângulo zenital solar, d<sub>r</sub> é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, T<sub>SW</sub> é a transmissividade atmosférica  $d_r$ =1+0,033 cos  $\left(\frac{DAS.2\Pi}{365}\right)$  em que DSA é o dia sequencial do ano.

<b>Etapa 10:</b> Radiação de onda longa incidente ( $R_{L\downarrow}$ )	$R_{L\downarrow} = \epsilon_a .\sigma T_a^{4}.$	Eq. (19)
$\epsilon_a$ é a emissividade atmosférica obtida por	ε <sub>a</sub> =0,85 (- In τ <sub>SW</sub> ) <sup>0,09</sup>	Eq. (20)
$\sigma$ é a constante de Stefan-Boltzmann e $T_a$ é a tem	peratura do ar (K).	

Os coeficientes dos pesos ( $\omega\lambda$ ), para o cálculo do albedo planetário através do uso de imagens Landsat 8, foram propostos por Silva et al. (2016) (Anexo A). Os valores de irradiâncias espectrais exoatmosféricas solares (ESOL), utilizados para o cálculo do albedo do topo da atmosfera, e os fatores multiplicativo (M<sub>L</sub>) e aditivo (AL), para reflectância e radiância espectral, são apresentados no Anexo B.

Após a determinação de cada um de seus componentes, o saldo de radiação foi calculado utilizando-se a Equação 21:

 $R_n \texttt{=} (1 \text{-} \alpha) R_C \downarrow \texttt{+} R_L \downarrow \texttt{-} R_L \uparrow \texttt{-} (1 \text{-} \epsilon_0) R_L \downarrow \quad \text{Equação 21}$ 

em que: Rn é o saldo de radiação (W m<sup>-2</sup>), α é albedo da superfície (adimensional), Rc↓ é a radiação de onda curta incidente (W m<sup>-2</sup>), R<sub>L</sub>↑ representa a radiação de onda longa incidente (W m<sup>-2</sup>), R<sub>L</sub>↓ é a radiação de onda longa emitida pela superfície (W m<sup>-2</sup>), e  $\varepsilon_0$  é a emissividade da superfície (adimensional).

Com o saldo de radiação (Rn) estimado foi possível calcular o fluxo de calor no solo (G), que representa a quantidade de energia utilizada para aquecimento do solo. No balanço de energia é o primeiro termo a ser determinado, utilizando-se a equação empírica apresentada por Bastiaanssen (2000), o fluxo de calor no solo (W m<sup>-2</sup>) pode ser obtido representando valores próximos ao meio-dia:

 $G = \left[ \frac{T_{S}}{\alpha} (0,0038 \ \alpha + 0,0074 \ \alpha^{2}) (1-0,98 \text{NDVI}^{4}) \right] R_{n} \quad \text{Equação 22}$ 

em que: Ts é a temperatura de superfície (°C), α é o albedo da superfície (adimensional), NDVI representa o índice de vegetação por diferença normalizada

(adimensional) e Rn é o saldo de radiação (W m<sup>-2</sup>). Para corpos hídricos em que NDVI é negativo, considera-se o termo G como sendo metade do saldo de radiação, ou seja, a relação G/Rn =0,5.

Em seguida foram realizados os cálculos do fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H). O fluxo de calor sensível consiste na taxa de calor perdido para o ar por convecção e condução, devido a um gradiente de temperatura. A determinação do fluxo de calor sensível (H) consiste na etapa de maior importância do algoritmo SEBAL. A estimativa deste fluxo é baseada na velocidade do vento, rugosidade e temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis próximos à superfície:

$$H = \frac{\rho C_{\rho} dT}{r_{ah}} \qquad Equação 23$$

em que: ρ é a densidade do ar úmido (kg m<sup>-3</sup>), Cp é o calor específico do ar à pressão constante (1004 J Kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), dT é a diferença de temperatura (K) entre dois níveis e r<sub>ah</sub> é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s m<sup>-1</sup>).

A equação apresenta duas incógnitas r<sub>ah</sub> e dT, logo, para calcular a variação de temperatura (dT) e a resistência rah, o SEBAL requer informações de dois pixels, denominados pixels âncoras (quente e frio). Para o pixel quente, admite-se fluxo de calor latente nulo (LE=0), enquanto para o pixel frio não há fluxo de calor sensível (H=0). A escolha destes pixels auxilia na determinação da resistência aerodinâmica r<sub>ah</sub> e da variação da temperatura (dT).

A etapa inicial para a estimativa de H requer informações da estação meteorológica próxima à área estudada: velocidade do vento (u) (m s<sup>-1</sup>) e altura média da vegetação (h) (m) no local da medição da velocidade do vento. O fluxograma do processo iterativo para a estimativa do fluxo de calor sensível (H) é descrito na Figura 3.



**Figura 3.** Fluxograma do processo iterativo para estimativa do fluxo de calor sensível (H). Fonte: Adaptado de Allen et al., 2002.

Inicialmente a resistência aerodinâmica entre dois níveis Z<sub>1</sub> e Z<sub>2</sub> foi computada admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra, segundo expressão:

em que: Z<sub>1</sub> e Z<sub>2</sub> são as alturas acima da superfície; u<sup>\*</sup> é a velocidade de fricção (m s<sup>-</sup> <sup>1</sup>) e K é a constante de Von Karman (0,41). Para o cálculo do valor de u<sup>\*</sup>, é requerida ao menos uma observação de velocidade do vento (u) da estação meteorológica da área de estudo, preferencialmente durante o intervalo de tempo coincidente com o horário da passagem do satélite. Assim, a partir do conhecimento do parâmetro u na altura de sua medição, é possível a estimativa deste em outros níveis acima da superfície do solo. No SEBAL, o parâmetro u<sup>\*</sup> é computado usando o perfil do logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra:

em que: K é a constante de Von Karman, u<sub>x</sub> é a velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>) na altura Z<sub>x</sub> (3,0 m), Z<sub>0m</sub> representa a rugosidade da superfície, a qual é dependente da altura h da vegetação (m) e é expressa, segundo Brutsaert (1982) por:

## $Z_{om} = 0,10 h$ Equação 26

Antes da realização da extrapolação de u<sup>\*</sup> para toda a imagem, calcula-se a velocidade do vento em uma altura cujos efeitos da rugosidade da superfície não influenciam o vento, denominada altura de mistura (*blending height*), considerada igual a 200 m. Com isso, a velocidade do vento para a altitude de 200 m no local da estação meteorológica é estimada conforme a expressão abaixo, considerando a atmosfera em equilíbrio neutro, com a hipótese de que u200 é constante para toda a cena estudada:

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right)}{K}$$
 Equação 27

em que: Z<sub>om</sub> é o coeficiente de rugosidade da superfície, obtido em função do índice de vegetação ajustado ao solo (BASTIAANSSEN, 2000):

Z<sub>om</sub>= exp (5,809 + 5,62 SAVI) Equação 28

A diferença de temperatura próxima à superfície  $\Delta T$  (°C) é calculada através dos pixels âncora (quente e frio). O cálculo de H nestes pixels é baseado na hipótese de existência de relação linear entre  $\Delta T$  e T<sub>S</sub> (temperatura da superfície):

## $\Delta T = b + a T_S$ Equação 29

em que:  $\Delta T$  é a diferença de temperatura (K), *a* e *b* são os coeficientes que precisam ser determinados a partir dos *pixels* quente e frio e T<sub>S</sub> é a temperatura da superfície de cada pixel da imagem (K).

O procedimento na escolha dos pixels âncora deve garantir que as condições extremas de fluxos de calor sejam bem representadas. O pixel frio deve ser escolhido em uma área de vegetação densa (preferencialmente área irrigada), com NDVI maior ou igual a 0,5 e IAF maior ou igual a seis, em que se assume que o fluxo de calor sensível (H) é nulo e o fluxo de calor latente (LE) é máximo, dado pela diferença entre Rn e G.

 $LE_{Frio} = Rn_{Frio} - G_{Frio} \qquad Equação \ 30$ 

Desta forma, a diferença de temperatura do pixel frio é nula, devido a H=0, conforme mostrado na equação abaixo:

$$\Delta T_{Frio} = \frac{Hr_{ah}}{\rho C_{\rho}} = 0$$
 Equação 31

Por sua vez, o pixel quente é escolhido em uma área de solo exposto, preferencialmente com intensa atividade da ação antrópica, em que se assume fluxo de calor latente nulo (LE) e fluxo de calor sensível (H) máximo:

Quanto à diferença de temperatura no pixel quente foi dada por:

$$\Delta T_{\text{Quente}} = \frac{(R_{\text{n}}-G)r_{\text{ah}}}{\rho C_{\rho}} \quad \text{Equação 33}$$

Com a obtenção das diferenças de temperatura nos pixels quente e frio, são determinados os coeficientes *a* e *b* a partir da Equação 29, montando-se um sistema simples com duas equações e duas incógnitas:

$$\Delta T_{Quente} = b + a T_{S(Quente)}$$
  $\Delta T_{Frio} = b + a T_{S(Frio)}$  Equação 34

A partir dos valores de diferença de temperatura e resistência aerodinâmica, os valores iniciais de calor sensível para cada pixel são determinados a partir da Equação 23.

Os valores iniciais obtidos de H em cada *pixel*, não são adequados e têm utilidade apenas como valor inicial do processo iterativo o qual, a cada iteração, tem por objetivo refinar o valor considerando efetivamente, resultando na condição de estabilidade atmosférica de cada pixel. Com isso, a identificação da estabilidade da atmosfera é realizada a partir da estimativa do comprimento de Monin-Obukhov (L):

$$L = \frac{\rho C_{\rho} u_* T_S}{KgH} \quad Equação 35$$

em que: Cp é o calor específico do ar (1004 J kg<sup>-1</sup>), u<sup>\*</sup> é a velocidade fricção (m s<sup>-1</sup>) em cada pixel, T<sub>S</sub> é a temperatura da superfície (K) de cada pixel, k é a constante de Von Karman (0,41), g é a aceleração da gravidade (9,81 m s<sup>-2</sup>) e H é o fluxo de calor sensível (W m<sup>-2</sup>) obtido inicialmente em cada pixel e p é a densidade do ar, dada pela expressão:

$$\rho = 3,486 \frac{P}{T (1-0,378 \frac{e_a}{P})^{-1}}$$
 Equação 36

em que: P é a pressão atmosférica na elevação z (kPa), T é a temperatura absoluta (K) e ea é a pressão real de vapor (kPa), conforme descrito em Allen et al. (1998). O comprimento de Monin-Obukhov está relacionado com o fluxo de calor sensível, pois

assume valores negativos (L<0) em condições instáveis (fluxo de calor sensível positivo), e valores positivos (L>0) em condições estáveis (fluxo de calor sensível negativo), se L = 0 a atmosfera é considerada neutra.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores de correção de estabilidade para o transporte de momentum (Ψm) e de calor (Ψh) deverão ser considerados. Para isto são utilizadas as formulações abaixo (Allen et al., 2002): - quando L < 0 (condição de instabilidade) tem-se que:

$$\Psi_{m(200m)} = 2 \ln\left(\frac{1+x_{(200 m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x_{(200 m)^{2}}}{2}\right) - 2 \arctan\left(x_{(200 m)}\right) + 0.5\pi$$
  
Equação 37  
$$\Psi_{h(2m)} = 2 \ln\left(\frac{1+x_{(2 m)^{2}}}{2}\right) \qquad \text{Equação 38}$$
  
$$\Psi_{h(0,1m)} = 2 \ln\left(\frac{1+x_{(0,1 m)^{2}}}{2}\right) \qquad \text{Equação 39}$$

em que:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{(200m)} &= \left(1 - 16 \, \frac{200}{L}\right)^{0.25} & \text{Equação 40} \\ \mathbf{x}_{(2m)} &= \left(1 - 16 \, \frac{2}{L}\right)^{0.25} & \text{Equação 41} \\ \mathbf{x}_{(0,1m)} &= \left(1 - 16 \, \frac{0.1}{L}\right)^{0.25} & \text{Equação 42} \end{aligned}$$

- quando L > 0 (condição de estabilidade):

$$\begin{split} \Psi_{m(200m)} &= -5 \, \begin{pmatrix} 2 \\ \overline{L} \end{pmatrix} & \text{Equação 43} \\ \Psi_{h(2m)} &= -5 \, \begin{pmatrix} 2 \\ \overline{L} \end{pmatrix} & \text{Equação 44} \\ \Psi_{h(0,1m)} &= -5 \, \begin{pmatrix} 0,1 \\ \overline{L} \end{pmatrix} & \text{Equação 45} \end{split}$$

Para quando a situação for L = 0, em condições neutras:  $\Psi$ m e  $\Psi$ h = 0. O valor corrigido da velocidade de fricção u<sup>\*</sup> (m s<sup>-1</sup>) é dado por:

$$u_{\star} = \frac{u_{200}K}{\ln\left(\frac{200}{Z_{om}}\right) - \Psi_{m(200m)}} \qquad \text{Equação 46}$$

em que:  $u_{200}$  é a velocidade do vento a 200 m (m <sup>s-1</sup>), k é a constante de von Karman (0,41),  $Z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e  $\Psi$ m (200m) é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 200 m. Com a obtenção de u<sup>\*</sup> corrigido, obtém-se o valor corrigido para a resistência aerodinâmica ao transporte de

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{Z_2}{Z_1} - \Psi_{h(Z_2)} + \Psi_{h(Z_1)}}{u_* K} \quad \text{Equação 47}$$

em que:  $Z_2$ = 2,0 m,  $Z_1$ =0,1 m, e  $\Psi$ h ( $Z_2$ ) e  $\Psi$ h ( $Z_1$ ) são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 1,0 m, respectivamente. Uma vez corrigidos u e  $r_{ah}$  volta-se ao cálculo da função da diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente até obtenção da estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura (dT) e da resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ). Em geral, são necessários de 5 a 10 iterações até que os valores se estabilizem (Allen et al., 2002).

O SEBAL estima o fluxo de calor latente com o método residual da equação do balanço de energia. Portanto, uma vez obtidos os fluxos de calor sensível no solo e o saldo de radiação, o calor latente pode ser obtido pela equação:

#### LE = Rn - G - H Equação 48

Para a obtenção da evapotranspiração diária (ET<sub>24h</sub>), é necessário obter a Fração Evaporativa Instantânea (FE<sub>i</sub>), definida com a razão entre LE e (Rn – G):

$$FE_i = \left(\frac{LE}{Rn-G}\right) = FE_{24h} = \frac{LE_{24h}}{Rn_{24h}}$$
 Equação 49

Admite-se que  $G_{24h} = 0$ . Assim, a LE<sub>24h</sub> será dada por:

$$LE_{24h} = FE_i \times R_{24h}$$
 Equação 50

Em que a Rn<sub>24h</sub> = Rs,<sub>24h</sub> (1- albedo) – 110 x  $\tau_{24h}$ . A conversão em LE<sub>24h</sub> em ET<sub>24h</sub> é dada por:

ET real diária = 0,035 × [(1-  $\alpha$ ) R<sub>s24h</sub>-110 × T<sub>24h</sub>] × FE<sub>i</sub> Equação 51

Para o cálculo da evapotranspiração de referência diária (ETo), Penman-Monteith FAO-56 (equação 52), foram utilizados os dados meteorológicos diários coletados na estação meteorológica ao longo do ano de 2015, seguindo a metodologia proposta por Allen et al. (1998), com o auxílio do software REF-ET (Allen, 2012).

ETo<sub>FAO</sub> = 
$$\frac{0,408 \Delta (\text{Rn-G}) + \frac{\gamma 900 u_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$
 Equação 52

em que: ETOFAO é a evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>), Rn é o saldo de radiação diário (MJ m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>), G é o fluxo de calor no solo (MJ m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>), T é a temperatura do ar média diária (°C), u2 é a velocidade do vento média diária a 2m de altura (ms<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> é a pressão da saturação de vapor média diária (Kpa); e<sub>a</sub> é a pressão atual de vapor média diária (Kpa);  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão

de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>) e  $\gamma$  é a constante psicométrica (KPa °C<sup>-1</sup>).

O cálculo do balanço hídrico sequencial diário (BHSD), durante o ano de 2015, foi realizado segundo o método proposto por Thornthwaite & Mather (1955), com o auxílio de uma planilha eletrônica elaborada por Rolim et al. (1998), abastecida com os dados diários de temperatura média do ar (°C) e precipitação pluvial (mm), além da latitude do local de estudo, considerando a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) de 100%.

A partir dos valores diários das evapotranspirações de referência e das ETr da cultura, obtidas com o SEBAL, calculou-se os coeficientes da cultura (Kc) para as três datas estudadas, por meio da Equação 53 (Doorenbos e Pruitt, 1975).

$$Kc = \frac{ETr}{ETo} \quad Equação 53$$

em que: ETr é a Evapotranspiração real da cultura (mm dia<sup>-1</sup>); ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia <sup>-1</sup>).

Os coeficientes de cultivo foram determinados, para as quatro áreas, por meio de equação polinomial linear para cada intervalo entre as imagens de satélite.

A eficiência do uso de água (EUA) pelo algodoeiro foi determinada por meio da relação entre a produtividade da cultura (kg ha<sup>-1</sup>) e a quantidade de água consumida durante o ciclo (mm), por meio da equação 54:

EUA= 
$$\frac{Y}{W}$$
 Equação 54

em que: EUA é a eficiência do uso da água, Y é o rendimento da cultura (kg ha<sup>-1</sup>), W é a quantidade de água consumida pela cultura (mm) (Doorenbos e Kassam, 1994) e o parâmetro W, que representa a evapotranspiração real da cultura ao longo do ciclo, foi calculado utilizando os valores diários de ETo (mm dia<sup>-1</sup>) e os valores de Kc obtidos para cada fase do algodoeiro. A EUA foi calculada a partir dos dados médios de rendimentos de fibra e de algodão em caroço (kg ha<sup>-1</sup>), para ambas as variedades, em cada uma das áreas de estudo.

#### Análise estatística

Para a análise da precisão das estimativas da ETr com SEBAL, foram utilizados o erro médio absoluto (EMA), erro relativo médio (ERM) (%), raiz do erro médio quadrático (RMSE) e o índice de concordância (d) desenvolvido por Wilmott et

al. (1985), conforme descrito nas Equações 55, 56, 57 e 58.

$$\begin{split} \mathsf{EMA} &= \frac{1}{\mathsf{N}} \sum_{i=1}^{\mathsf{N}} |\mathsf{ET}_{\mathsf{SEBAL}} - \mathsf{ET}_{\mathsf{FAO}}| & \mathsf{Equação 55} \\ \\ &\mathsf{ERM} = \frac{100}{\mathsf{N}} \sum_{i=1}^{\mathsf{N}} \frac{|\mathsf{ET}_{\mathsf{SEBAL}} - \mathsf{ET}_{\mathsf{FAO}}|}{\mathsf{ET}_{\mathsf{FAO}}} & \mathsf{Equação 56} \\ \\ &\mathsf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\mathsf{ETr}_{\mathsf{SEBAL}} - \mathsf{ETr}_{\mathsf{FAO}})^2}{\mathsf{n}}} & \mathsf{Equação 57} \\ \\ &\mathsf{d} = 1 - \left[ \frac{\sum (\mathsf{ETr}_{\mathsf{SEBAL}} - \mathsf{ETr}_{\mathsf{FAO}})^2}{\sum (|\mathsf{ETr}_{\mathsf{SEBAL}} - \overline{\mathsf{X}}_{\mathsf{SEBAL}}| + |\mathsf{ETr}_{\mathsf{FAO}} - \overline{\mathsf{X}}_{\mathsf{FAO}}|)^2} \right] & \mathsf{Equação 58} \end{split}$$

Para a verificação entre o grau de associação entre os parâmetros obtidos com o SEBAL, em cada cultivar de algodão, inicialmente os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Kolmogorov Smirnov), utilizando o software Microsoft Office Excel®, quando não verificado a suposição de normalidade foram realizadas análises de correlação linear de Spearman entre as variáveis biofísicas, Etr e Kc com o software estatístico R (R Core Team, 2018).

#### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### Ciclo da cultura e análise micrometeorológica

De acordo com as datas de semeadura e colheita do algodão as áreas cultivadas com TMG 43 WS tiveram ciclo de 206 (área A) e 211 (área B) dias, enquanto as áreas com a cultivar FM 940 GLT completaram seu ciclo com 214 (área D) e 216 (área C) dias após semeadura. Ambas as cultivares foram caracterizadas como variedades tardias, pois, considerando o tempo necessário para que 90% dos frutos estejam abertos, neste grupo de maturação tardia estão as cultivares com ciclo acima de 170 dias, enquanto os de maturação precoce e média possuem ciclos de 120 a 130 dias, e de 140 a 160 dias, respectivamente (Chiavegato et al., 2009).

O ciclo do algodoeiro é definido pela constituição genética da planta, porém é fortemente influenciado pelo ambiente (água, luz e temperatura) e, embora a transição entre os processos de desenvolvimento da cultura não sejam claramente distinguíveis,

devido ao hábito de crescimento indeterminado do algodoeiro, as principais fases de desenvolvimento da planta podem ser determinadas a partir dos processos fisiológicos que caracterizam cada período com base na duração aproximada de cada fase, segundo os valores de referência adotados pela FAO, o que permitiu a subdivisão do ciclo para ambas as variedades (Tabela 3) (Allen et al., 1998; Chiavegato et al., 2009;).

**Tabela 3.** Duração aproximada dos estágios de crescimento do algodoeiro (dias) e datas de início das fases de desenvolvimento da cultura para um ciclo médio de 190 dias.

Fase de Desenvolvimento	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV		
Duração (dias)*	30	50	60	50		
Área	Data de início					
Α	31/01/2015	02/03/2015	21/04/2015	21/06/2015		
В	27/01/2015	26/02/2015	17/04/2015	17/06/2015		
С	20/01/2015	19/02/2015	10/04/2015	10/06/2015		
D	16/01/2015	15/02/2015	06/04/2015	06/06/2015		

Fase I: Semeadura até 10% de cobertura de solo; Fase II: 10% de cobertura de solo ao início da floração; Fase III: Início da floração ao início da maturação; Fase IV: Início ao final da maturação. \*Fonte: Allen et al. (1998)

Ao longo do ciclo da cultura, entre 16 de janeiro e agosto de 2015, foi registrada uma precipitação pluvial total de 666 mm, e anual de 1269 mm em 2015 (Figura 4). O mês de setembro registrou a maior temperatura máxima (34,77 °C) e julho as temperaturas mais amenas (15,72 °C) (Figura 5). Entre maio e setembro (estação seca), a umidade relativa do ar (UR) diminuiu devido à ausência de chuvas que caracterizam essa estação. A evapotranspiração de referência (ETOFAO) apresentou valores mensais entre 96 mm mês<sup>-1</sup> e 182 mm mês<sup>-1</sup>, sendo maio e setembro, respectivamente, os meses de menor e maior demanda atmosférica.



**Figura 4.** Precipitação (Prec.) e evapotranspiração de referência (Evap.) acumuladas mensais e umidade relativa do ar (UR) média mensal, no ano de 2015, Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.



**Figura 5.** Temperaturas médias máximas, médias e médias mínimas mensais do ar no ano de 2015, Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.

Em relação às condições micrometeorológicas nos meses que compreendem as datas das imagens de satélite selecionadas, o mês de fevereiro de 2015 acumulou 180,84 mm de precipitação com temperatura média de 23,42 °C, máxima de 33,33 °C e mínima de 18,22 °C. Em maio, a precipitação acumulada foi de 53,34 mm com temperaturas média de 22,41 °C, máxima de 30,60 °C e mínima de 17,67 °C. O mês de agosto teve a maior amplitude térmica, com máxima de 36,16 °C e mínima de 13,67 °C, com nenhum evento de precipitação. Os maiores valores de radiação solar global ocorreram em fevereiro e os menores em maio, devido a declinação solar (Buriol et al., 2012). As variáveis micrometeorológicas nos dias da passagem do satélite estão resumidas na Tabela 4.

**Tabela 4.** Dados diários de evapotranspiração de referência Penman-Monteith (ETO<sub>FAO</sub>, mm dia <sup>-1</sup>), precipitação acumulada (Prec., mm), temperatura do ar média (**Tar**, <sup>o</sup>C), umidade relativa do ar média (UR, %), radiação global incidente (Rg, MJ m<sup>-2</sup>), velocidade do vento média (VV, ms<sup>-1</sup>) e índice de transmissividade atmosférica (Kt, adimensional) nas datas da passagem do satélite.

Data	<b>ETO</b> FAO	Prec.	Tar	UR	VV	Rg	Kt
03/fev	4,69	1,27	24,27	75,90	1,60	21,13	0,52
26/mai	3,71	0,00	23,83	80,61	1,04	16,88	0,52
14/ago	5,46	0,00	23,81	49,02	1,90	22,69	0,69

Considerando os índices de transmissividade atmosférica (Kt) (Tabela 4), a cobertura do céu foi classificada como "céu limpo", em 26 de maio e 14 de agosto, com Kt > 0,65, e "céu parcialmente nublado" em 03 de fevereiro ( $0,35 \le Kt \ge 0,55$ ) (Escobedo et al., 2008). A composição atmosférica (nuvens, vapor de água e aerossóis) interfere na transmissão da radiação global, dessa forma, são esperados para os meses secos do ano maiores valores de Kt, enquanto que na estação chuvosa, com a maior concentração de nuvens e vapor de água na atmosfera, os valores de Kt são menores (Souza et al., 2016).

Observa-se, a partir da análise do Balanço hídrico sequencial diário (Figura 6), que a deficiência hídrica ao longo do ano de 2015 foi maior a partir do 150º dia sequencial do ano (DSA), estendendo-se até o 300º DAS. Durante o ciclo da cultura (16 a 237 DSA), entre os dias 110 e 114, o déficit hídrico foi mais acentuado, cerca de 1,2 mm dia<sup>-1</sup> em média. Em outros períodos, tanto na fase inicial quanto final do ciclo, foram registradas deficiências inferiores a 1,0 mm dia<sup>-1</sup>.



**Figura 6.** Balanço hídrico sequencial diário, segundo método de Thornthwaite & Mather (1955), correspondente ao período de janeiro a dezembro de 2015.

O algodoeiro herbáceo requer, para altas produtividades, precipitação entre 500 mm e 1.500 mm, e a demanda hídrica de cultivares de ciclo curto (120 a 130 dias) e médio (140 a 160 dias), pode variar entre 500 mm a 700 mm (Chiavegato et al., 2009). A demanda diária de água aumenta ligeiramente com o crescimento das plantas, sendo máxima na fase de florescimento e enchimento de maçãs (Zonta et al., 2016).

A deficiência hídrica está entre os principais fatores abióticos responsáveis por causar danos à cultura, juntamente com a falta de luminosidade e altas temperaturas. Os danos a planta dependem da severidade e duração do período de estresse. O clima adequado ao estágio de florescimento apresenta umidade suficiente no solo, dias ensolarados e temperaturas crescentes - não superiores a 30 °C - quando ocorre declínio na eficiência fotossintética da planta. Na fase reprodutiva, para a maturação e deiscência uniforme, são requeridas temperaturas amenas e radiação solar, além de baixos índices pluviométricos, uma vez que a umidade diminui a qualidade da fibra (Silva et al., 2011).

### Índices de vegetação: NDVI e IAF

O NDVI é uma variável que indica a quantidade e a condição da vegetação. É alterado, entre outros fatores, em função da quantidade de biomassa, cobertura foliar e estágio de desenvolvimento das culturas (Borella et al., 2018). Na fase inicial de desenvolvimento do algodoeiro são esperados menores valores de NDVI, em decorrência da cobertura reduzida do solo pelas plantas. Em 03 de fevereiro, o NDVI médio das áreas ficou entre 0,22 e 0,25 com coeficientes de variação inferiores a 4,0% (Tabela 5). Esses valores são condizentes com locais de vegetação rala ou solo exposto, conforme relatado por Fausto et al. (2016) no município de Barra do Bugres - MT, Demarchi et al. (2011) em Santa Cruz do Rio Pardo – SP e Matos et al. (2015) nas proximidades do reservatório de Itaparica – PE.

Tabela 5. Médias (± DP) do índice de área foliar (IAF, m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI), albedo (α), temperatura da superfície (Tsup, K), fluxo de calor no solo (G, W m<sup>-2</sup>), saldo de radiação instantâneo (Rn<sub>inst</sub>, W m<sup>-2</sup>), saldo de radiação diário (Rn<sub>24h</sub>, W m<sup>-2</sup>,) e evapotranspiração real (ETr, mm dia<sup>-1</sup>) da cultura do algodão, Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.

Áraa	Cultivor	DAS	Média ± DP								
Area	Cultivar		IAF	NDVI	α	Tsup	G	Rninst	Rn <sub>24h</sub>	ETr	
	03/02/2015										
А	TMG 43 WS	3	0,19 ± 0,01	$0,23 \pm 0,00$	0,20 ± 0,01	299,65 ± 0,58	88,88 ± 1,38	634,52 ± 8,61	137,19 ± 1,66	$2,81 \pm 0,33$	
В	TMG 43 WS	7	$0,18 \pm 0,02$	0,22 ± 0,01	0,20 ± 0,01	$299,21 \pm 0,44$	87,77 ± 1,13	637,42 ± 9,98	137,29 ± 2,17	$3,01 \pm 0,27$	
С	FM 940 GLT	14	$0,22 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,01$	$301,99 \pm 0,20$	$94,43 \pm 0,52$	598,99 ± 5,86	131,12 ± 1,50	$1,41 \pm 0,12$	
D	FM 940 GLT	18	$0,24 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$	0,22 ± 0,01	300,81 ± 0,33	91,58 ± 0,76	609,72 ± 5,56	132,16 ± 1,35	$2,05 \pm 0,19$	
	26/05/2015										
А	TMG 43 WS	115	$6,00 \pm 0,00$	$0,84 \pm 0,00$	$0,25 \pm 0,00$	294,62 ± 0,10	27,65 ± 0,71	452,19 ± 2,51	100,90 ± 1,03	$3,34 \pm 0,03$	
В	TMG 43 WS	119	$6,00 \pm 0,00$	0,85 ± 0,01	$0,26 \pm 0,00$	294,64 ± 0,15	27,38 ± 0,91	449,56 ± 3,16	99,97 ± 1,13	$3,31 \pm 0,05$	
С	FM 940 GLT	126	$6,00 \pm 0,00$	0,84 ± 0,01	$0,25 \pm 0,01$	295,17 ± 0,11	28,51 ± 1,45	451,78 ± 3,62	101,92 ± 1,39	$3,25 \pm 0,05$	
D	FM 940 GLT	130	$6,00 \pm 0,00$	$0,84 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,00$	295,35 ± 0,14	29,53 ± 0,77	452,36 ± 2,33	102,51 ± 0,94	$3,23 \pm 0,04$	
	14/08/2015										
А	TMG 43 WS	195	$0,64 \pm 0,02$	0,40 ± 0,01	$0,23 \pm 0,00$	305,43 ± 0,22	75,96 ± 0,33	439,20 ± 2,22	120,98 ± 0,71	$1,93 \pm 0,08$	
В	TMG 43 WS	199	$0,67 \pm 0,09$	0,41 ± 0,03	$0,23 \pm 0,00$	305,04 ± 0,25	75,23 ± 0,85	$442,60 \pm 2,03$	121,35 ± 0,50	$2,08 \pm 0,07$	
С	FM 940 GLT	206	$0,37 \pm 0,08$	$0,30 \pm 0,03$	$0,25 \pm 0,00$	305,75 ± 0,41	77,20 ± 0,98	$422,40 \pm 2,39$	115,69 ± 0,73	$1,78 \pm 0,13$	
D	FM 940 GLT	210	$0,32 \pm 0,03$	0,28 ± 0,01	$0,24 \pm 0,00$	306,38 ± 0,20	78,51 ± 0,32	426,91 ± 2,84	118,61 ± 0,87	$1,67 \pm 0,07$	
<b>D</b> 4 0											

DAS: Dias Após Semeadura; DP: Desvio Padrão

Diversos fatores interferem na resposta espectral da cobertura vegetal (Borges et al., 2010). Com o desenvolvimento da cultura e aumento do dossel, a influência do solo na resposta espectral diminui (Motomiya et al., 2012). Os valores de NDVI estão associados às características de cada área, portanto, as diferenças observadas justificam-se devido as datas de semeadura e a população de plantas por hectare não coincidirem entre as áreas. O que foi confirmado pelo IAF, em que os menores valores estão associados as áreas nas quais a emergência do algodoeiro é recente ou incompleta, áreas B e A, respectivamente.

Os maiores valores de NDVI (0,84-0,85) corresponderam a cena de 26 de maio (Figura 7), com comportamento semelhante do IAF em ambas as cultivares. Nesse período, o algodoeiro apresentava elevada produção de biomassa e, assim como descrito por Borges et al. (2010), os picos de NDVI coincidiram com os do índice de área foliar. Constata-se que existe uma estreita relação entre os valores médios diários de NDVI e IAF, com uma forte correlação (R=0,98, p<0,001) para ambas as cultivares (Tabela 6).

Nos locais em que a cultura possui desenvolvimento satisfatório - isenta de pragas e doenças - são esperados maiores valores de NDVI e menor variabilidade nos dados, ao passo que, em lavouras afetadas por agentes bióticos a ocorrência de estresse fisiológico na planta interfere na reflectância do dossel (Motomiya et al., 2012).


**Figura 7.** Índice de vegetação de diferença normalizada (**NDVI**), saldo de radiação instantâneo (**Rn**<sub>inst</sub>, **W** m<sup>-2</sup>), temperatura da superfície (**Tsup**, **K**), albedo ( $\alpha$ ) e evapotranspiração real (**ETr**, **mm dia**<sup>-1</sup>) da cultura do algodão, cultivares TMG 43 WS (Áreas A e B) e FM 940 GLT (Áreas C e D), Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.

**Tabela 6.** Matriz de correlação de Spearman do albedo de superfície (α), evapotranspiração real (**ETr**), índice de área foliar (**IAF**), índice de vegetação da diferença normalizada (**NDVI**), saldo de radiação instantâneo (**Rn**<sub>inst</sub>), temperatura da superfície (**Tsup**) e coeficiente da cultivo (**Kc**) do algodoeiro, cultivares FM 940 GLT e TMG 43 WS, Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.

FM 940 GLT								
	α	ETr	IAF	NDVI	RNINST	Tsup	Kc	
Α	1,00					-		
ETR	0,47***	1,00						
IAF	0,83***	0,78***	1,00					
NDVI	0,85***	0,76***	0,98***	1,00				
RNinst	-0,72***	0,06***	-0,46***	-0,47***	1,00			
TSUP	-0,27***	-0,79***	-0,50***	-0,52***	-0,45***	1,00		
Kc	0,20***	0,63***	0,45***	0,44***	0,44***	-0,88***	1,00	
			TMG 4	3 WS				
	А	ETr	IAF	NDVI	RNINST	Tsup	Kc	
Α	1,00							
ETr	0,31***	1,00						
IAF	0,93***	0,38***	1,00					
NDVI	0,94***	0,35***	0,98***	1,00				
RNinst	-0,54***	0,58***	-0,46***	-0,48***	1,00			
Tsup	-0,43***	-0,97***	-0,46***	-0,46***	-0,50***	1,00		
Kc	0,39***	0,99***	0,45***	0,42***	0,54***	-0,98***	1,00	

\* p ≤ 0,05; \*\* p≤0,01; \*\*\* p ≤ 0,001

Os NDVIs na cena de 14 de agosto foram de 0,40 e 0,41 nas áreas A e B (cultivar TMG 43 WS) e de 0,30 e 0,28 nas áreas C e D (cultivar FM 940 GLT) (Tabela 5). Sabe-se que a variabilidade deste índice durante o ciclo da cultura segue o desenvolvimento fenológico do algodoeiro. Desse modo, ao final do ciclo há alterações na resposta espectral em decorrência de uma maior área de solo exposto e diminuição do vigor vegetativo da planta, o que justifica menores valores de NDVI.

O Índice de Área Foliar (IAF), estimado por meio do índice SAVI, é uma variável biofísica indicadora da biomassa de cada pixel. É obtido pela razão entre a área foliar do dossel por unidade de área projetada no solo por essa vegetação (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>). Seu valor máximo (6,0) ocorre quando o índice SAVI é equivalente a 0,69 (Allen et al., 2002).

O IAF acompanhou o desenvolvimento da cultura, como esperado. Na análise

de 03 de fevereiro o índice foi ligeiramente maior nas áreas cultivadas com FM 940 GLT (C e D) (Tabela 5). Na área B foi observada a maior variabilidade do IAF em relação as demais áreas. Ambas as cultivares apresentaram no mês de maio o valor máximo de IAF estimado pelo algoritmo. Os maiores valores ocorrem quando a cultura se encontra no auge do seu desenvolvimento – com emissão de flores, formação de maças e abertura de capulhos – exigindo maior consumo de água do que nos outros estágios (Bezerra BG et al., 2012).

Devido ao hábito de crescimento indeterminado do algodoeiro herbáceo, a planta continua a emitir folhas e estruturas reprodutivas que não resultam em ganhos efetivos de produção e geram competição entre os órgãos vegetativos e reprodutivos, além de dificultar a colheita mecanizada e reduzir a qualidade da fibra, que é o principal produto do algodão (Silva et al., 2011).

Para adequar a lavoura a colheita mecanizada e diminuir a competição entre as plantas, os produtores recorrem a aplicação de reguladores de crescimento na cultura. Geralmente, as aplicações iniciam-se quando as plantas apresentam os primeiros botões florais. Os indicadores para a tomada de decisão do momento ideal de aplicação são as condições climáticas e a taxa de crescimento diária da planta. A ocorrência de temperaturas acima de 32 °C, com umidade disponível no solo, juntamente com uma taxa de crescimento elevada dos entrenós do ponteiro, indicam a necessidade de aplicação de regulador (Echer et al., 2014).

No período que antecede a colheita do algodão, o padrão espectral da vegetação é heterogêneo, a lavoura caracteriza-se pela senescência significativa das folhas, presença de capulhos, vegetação seca e solo exposto. Com a maturação fisiológica da planta e fechamento do ciclo da cultura, os índices de área foliar decresceram, com médias de IAF de 0,64-0,67, para a cultivar TMG 43 WS, e de 0,32-0,37 para as áreas cultivadas com FM 940 GLT (Tabela 5).

O uso de desfolhantes e maturadores na pré-colheita contribuem para as alterações na reflectância do dossel. A prática é comum na cotonicultura e tem por objetivo a preservação da qualidade da fibra. Os produtos causam abscisão dos pecíolos das folhas, proporcionam a queda antecipada da folhagem e evitam a rebrota do algodoeiro, além de possibilitar a antecipação da colheita (Santos et al., 2014). A recomendação é que a desfolha da planta ocorra quando 70 a 80% dos frutos (capulhos) estiverem abertos e as maçãs mais novas estiverem maduras (Silva et al.,

2011).

Os defensivos utilizados para este fim são compostos por herbicidas não seletivos (diuron + thidiazuron), que promovem a desfolha com a queda das folhas ainda verdes na planta; e reguladores de crescimento (ethefon + cyclanilide), utilizados para uniformizar a maturação e a abertura das maçãs (pelo aumento da concentração de etileno), além de provocarem a queda das folhas.

O IAF médio observado na análise de 14 de agosto pode ter sido influenciado pelas datas de aplicações do desfolhante e do maturador que ocorreram em 24 de julho/2015, nas áreas com a cultivar FM 940 GLT, e em 11 de agosto/2015 nas áreas com a cultivar TMG 43 WS. Devido as características dos defensivos mencionados, a diferença no percentual de queda das folhagens nesse intervalo (18 dias) pode ser considerada expressiva. De acordo com Santos et al. (2014), a desfolha na planta é de cerca de 33% cinco dias após a aplicação (DAA) do produto, chegando a 95% de desfolha aos 15 DAA.

#### Albedo da superfície

O albedo é um coeficiente de reflexão determinado pela razão entre radiações de ondas curtas refletidas e incidentes, essencial no cálculo do saldo de radiação, onde são subtraídos todos os fluxos de radiação de saída de todos os fluxos de radiação de entrada (Allen et al., 2002). As variações nos valores de albedo são atribuidas a varios fatores, dentre eles, a época do ano, a cor da superfície e a cobertura vegetal (Gomes et al., 2013).

O albedo de superfície estimado em 03 de fevereiro foi superior nas áreas C e D (0,22-0,23; FM 940 GLT) em comparação as áreas com plantio recém realizado com a cultivar TMG 43 WS, com média de 0,20 (Tabela 5). A existência de restos culturais da safra anterior, resultantes da colheita de soja ou de culturas de cobertura, evita que o solo fique totalmente descoberto e com isso há uma menor reflexão. Durante o estágio inicial, quando a cultura não cobre todo o solo, o comportamento do albedo provém da cobertura vegetal existente e do solo, este quanto maior o seu teor de umidade, menor será sua reflexão (Souza et al., 2010). Por conseguinte, os valores médios encontrados, entre 0,20 e 0,23, podem ter sido causados pela ocorrência de chuvas no dia anterior (02/fevereiro) à passagem do satélite (Gomes et al., 2017).

Em locais de solo exposto, logo após a semeadura, ou ainda, na fase de desenvolvimento inicial da cultura, o albedo de superfície pode variar entre 20 e 30%, conforme relatado por Borges et al. (2010) no algodão e Leitão e Oliveira (2000) (29,8%) no amendoim. A variabilidade dos valores de albedo entre as áreas, para uma mesma data, pode ser atribuída a diferenças nas datas de plantio e ao manejo da cultura visto que, fertilidade, umidade do solo e a ocorrência de pragas e doenças acarretam em diferentes respostas espectrais (Borges et al., 2010).

Na data de 26 de maio, o albedo de superfície médio esteve entre 0,25 e 0,26, ou seja, houve uma tendência de acréscimo do albedo em consequência do desenvolvimento da cultura, confirmado pelos maiores valores de NDVI e IAF indicando que a cultura estava na Fase III - início da floração ao início da maturação – que corresponde ao máximo desenvolvimento das plantas.

No final do ciclo do algodoeiro (cena de agosto), com o processo de desfolha química, a qual as plantas são submetidas, o albedo de superfície decresceu - com exceção da área C que manteve 0,25 - em decorrência da vegetação rala e queda das folhas na pré colheita (Tabela 5).

O albedo de superfície diminuiu ao final do ciclo com a senescência das plantas, o que demonstra a resposta deste índice à diminuição do IAF, fato evidenciado também pela forte correlação entre essas variáveis (R= 0,83, p<0,001, cultivar FM 940 GLT; R= 0,92, p<0,001, cultivar TMG 43 WS) (Tabela 6). Comportamento semelhante em outras culturas foram descritos por Souza et al. (2010) na soja, Leitão e Oliveira (2000) no amendoim.

### Temperatura da superfície

A temperatura da superfície é uma variável climática relevante para o planejamento ambiental de qualquer região (Leite e Brito, 2013). As estimativas obtidas por sensoriamento remoto são utilizadas em estudos envolvendo o clima e as mudanças climáticas (Matos et al., 2015); na detecção dos fenômenos de ilha de calor nos centros urbanos (Gomes et al., 2017), e ainda, nas estimativas de trocas radiativas e energéticas decorrentes das mudanças no uso e cobertura do solo nos Biomas

Cerrado (Fausto et al., 2016); Caatinga (Silva et al., 2015) e Amazônico (Silva et al., 2015).

As bandas termais registram a temperatura de brilho, que consiste na radiância monocromática registrada pelo sensor dos satélites (Leite e Brito, 2013). As estimativas de temperatura da superfície com o algoritmo SEBAL requerem, além da temperatura de brilho, os valores de emissividade da superfície em cada pixel (obtido por meio do NDVI e IAF). Esse parâmetro representa a razão entre a energia térmica irradiada pela superfície, e a energia térmica irradiada por um corpo negro na mesma temperatura (Allen et al., 2002).

A variação espacial e temporal da temperatura da superfície obtidas com o SEBAL estão descritas na Tabela 5. Observa-se que a maior amplitude térmica ocorreu em 03 de fevereiro (± 2,0 K), com temperaturas superiores a 300 K nas áreas cultivadas com FM 940 GLT; e as maiores temperaturas médias em 14 de agosto (306,40 K). A diferença observada nos valores entre as datas pode estar relacionada à radiação solar incidente em cada cena (Silva et al., 2015).

Durante o mês de maio a temperatura média das áreas agrícolas manteve-se próxima de 295 K. Houve, portanto, diminuição na temperatura com o aumento do dossel da cultura que corresponde aos maiores valores de NDVI. Resultados semelhantes foram descritos por Matos et al. (2015) em área agrícola irrigada, com redução na temperatura em torno de 26,9% com o aumento da vegetação.

A influência da cobertura vegetal na diminuição da temperatura pode ser resultante de vários fatores, como a alteração da velocidade do vento, a rugosidade de vegetação, o direcionamento das folhas no sentido do fluxo de ar – tanto em coberturas vegetais de baixo porte como em vegetação esparsa (Silva et al., 2015). A vegetação diminui a temperatura do solo devido ao sombreamento direto e modifica o particionamento de energia, aumentando o fluxo de calor latente de evaporação, por conseguinte, com a atenuação da temperatura, a radiação de onda longa emitida pelo solo e pelas folhas diminui (Frey et al., 2007).

Segundo Thompson et al. (2017), em locais com menores valores de albedo de superfície os saldos de radiação são maiores e, consequentemente, as temperaturas na superfície são mais amenas. As classes de características antrópicas possuem menores saldos de radiação e maiores temperaturas de superfície, em função da conversão de parte da energia refletida em calor sensível, responsável pelo aquecimento do ar (Thompson et al., 2017).

Na imagem de 14 de agosto, houve aumento de temperatura na ordem de 294 para 305 K em comparação com a cena de maio, em decorrência da diminuição da biomassa ao final do ciclo, conforme corroborado pela forte correlação negativa entre as variáveis IAF e temperatura da superfície para ambas datas analisadas (R= -0,89,  $p\leq0,001$ , cultivar FM 940 GLT; R= -0,79,  $p\leq0,001$ , cultivar TMG 43 WS) (Tabela 6), podendo-se inferir que a quantidade de biomassa ao longo do ciclo do algodoeiro influenciou os valores de temperatura da superfície. Esse comportamento é resultado do efeito do acúmulo de massa verde juntamente com a disponibilidade hídrica sobre a transpiração das plantas (Borges et al., 2010).

Em áreas com baixa biomassa, grande parte da energia disponível no ambiente é utilizada nos processos de aquecimento do ar e do solo (Martins et al., 2015). Espera-se que em condições de solo exposto ou zonas urbanas, a temperatura da superfície seja maior (Lins et al., 2017). Essa dinâmica espacial é observada mesmo em locais com condições climáticas diferenciadas.

#### Fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo (G) representa a fração do balanço de energia transferida por processos de condução ou difusão térmica no solo. O G é resultado do albedo, temperatura da superfície e da cobertura vegetal, indicando que seus valores são maiores quando se tem pouca vegetação, e à medida que a vegetação se desenvolve, o G vai decrescendo (Bezerra et al., 2014).

Os valores médios do fluxo de calor no solo foram semelhantes nas áreas compostas pela mesma cultivar (Tabela 5). Em geral, nas áreas cultivadas com TMG 43 WS (A e B), foram registrados os menores valores de G. Para o dia 3 de fevereiro, as estimativas de fluxo de calor no solo ficaram, em média, entre 88,98 W m<sup>-2</sup> (área A) e 94,43 W m<sup>-2</sup> (área C). Em 26 de maio, com o aumento da biomassa do algodoeiro e diminuição da temperatura da superfície, os valores estimados do fluxo de calor no solo diminuíram cerca de 68,83% e 63,16% em comparação as cenas de fevereiro e agosto, respectivamente. Na análise de 14 de agosto, o fluxo de calor no solo médio estimado nas áreas A e B foi de 75,59 W m<sup>-2</sup>, e nas áreas C e D 77,85 W m<sup>-2</sup>.

Gomes et al. (2017), em estimativas do fluxo de calor no solo com SEBAL, encontraram valores máximo de 89,3 W m<sup>-2</sup> e mínimo de 1,2 W m<sup>-2</sup> no ano de 2011 na região de Ilha Solteira – SP. Segundo os autores, são esperados em corpos hídricos ou em área de vegetação com retenção de água - portanto com maior umidade - menores valores de fluxo de calor no solo, ao passo que maiores valores correspondem a locais de solo exposto sem vegetação e áreas urbanas.

#### Saldo de radiação instantâneo e saldo de radiação médio diário

O saldo de radiação líquido corresponde à quantidade de energia que está disponível na superfície para aquecer o solo, aquecer o ar e evaporar a água (Allen et al., 2002). É contabilizado pela energia incidente que chega (ondas curtas) menos a energia emitida que saí (ondas longas), e sua variabilidade é influenciada, entre outros fatores, pelas características da própria superfície (Gomes et al., 2013).

As maiores diferenças no saldo de radiação instantâneo (Rn<sub>inst</sub>) entre as duas cultivares ocorreram no mês de fevereiro, com Rn<sub>inst</sub> para a cultivar TMG 43 WS de 634,52 W m<sup>-2</sup> (área A) e 637,52 W m<sup>-2</sup> (área B), já para a cultivar FM 940 GLT Rn<sub>inst</sub> de 598,99 W m<sup>-2</sup> (área C) e 609,72 W m<sup>-2</sup> (área D) (Tabela 5). Para o saldo de radiação diário médio em 24 horas (Rn<sub>24h</sub>), os valores ficaram entre 131,64 W m<sup>-2</sup> (áreas A e B) e 137,24 W m<sup>-2</sup> (áreas C e D). Tais valores são superiores aos observados nas demais datas devido a cobertura do solo e maior quantidade de radiação global disponível (Alves et al., 2017; Borella et al., 2018).

Para o dia 26 de maio, os saldos de radiação instantâneo e diário foram semelhantes entre as cultivares (Tabela 5). A radiação solar global e as características da superfície influenciam o saldo de radiação. Como esperado, os menores valores foram obtidos no estágio de maior IAF, quando há um melhor aproveitamento da energia com o desenvolvimento da cultura e maior densidade do dossel (Borella et al., 2018).

Em 14 de agosto, o Rn<sub>inst</sub> foi menor em comparação com o mês de maio devido aos maiores valores de temperatura da superfície e baixa umidade relativa do ar. A temperatura é maior e, consequentemente, a emissão de radiação de ondas longas pela superfície aumenta, diminuindo o balanço de ondas longas e interferindo no Rn<sub>inst</sub> (Martins et al., 2015). As variações nos valores do saldo de radiação entre

as áreas, para uma mesma data, podem ser atribuídas ao maior ou menor vigor vegetativo da cobertura vegetal (Alves et al., 2017).

Observa-se que o Rn<sub>inst</sub> entre fevereiro e agosto acompanhou a redução da radiação solar incidente ao longo do ciclo, corroborando com resultados de Borges et al. (2010), nos quais uma redução significativa nos valores de Rn foi atribuída aos menores valores de radiação solar incidente. Não obstante, segundo os autores, no período de colheita a redução no saldo de radiação é potencializada pelo aumento da temperatura da superfície, justificando os valores obtidos em 14/agosto.

Os resultados obtidos para o saldo de radiação estão de acordo com os reportados na literatura. Em área de Cerrado, Fausto et al. (2016) estimaram, a partir de imagens do Landsat 5, saldo de radiação diário médio de 160,0 W m<sup>-2</sup> em locais de solo exposto, e 175,0 W m<sup>-2</sup> em áreas agrícolas constituídas por soja, cana-de-açúcar e pastagens, conforme os autores, a substituição do Cerrado por culturas agrícolas implica em alterações nos índices biofísicos da superfície.

#### Evapotranspiração real diária

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do ciclo hidrológico e elemento principal no balanço hídrico em ecossistemas agrícolas (Carvalho et al., 2015). Corresponde aos processos de transpiração pela planta e de evaporação pelo solo. As informações a respeito da variabilidade temporal e espacial da ET auxiliam na gestão de uso da água em bacias hidrográficas e nos estudos hidrológicos (Oliveira et al., 2014), no planejamento da irrigação (Fan et al., 2018) e na estimativa das necessidades hídricas das culturas (Santos et al., 2014.

A evapotranspiração real (ETr), estimada para as áreas de estudo na Fazenda Paiaguás, apresentaram, ao longo do ciclo, valores médios entre 1,93 e 3,34 mm dia<sup>-1</sup> (cultivar TMG 43 WS), e entre 1,41 e 3,25 mm dia<sup>-1</sup> (cultivar FM 940 GLT) (Tabela 5). A evapotranspiração acumulada ao longo do ciclo foi de 539,01 mm dia<sup>-1</sup>, área A; 554,80 mm dia<sup>-1</sup>, área B; 465,18 mm dia<sup>-1</sup>, área C e 496,20 mm dia<sup>-1</sup>, área D. A ETr diária e a ETo<sub>FAO</sub> em cada fase de desenvolvimento da cultura estão demonstradas nas Figuras 8 e 9 (TMG 43 WS); 10 e 11 (FM 940 GLT).



**Figura 8.** Evapotranspiração diária (ET) de referência e da cultura durante o ciclo do algodoeiro, área A, cultivar TMG 43 WS.



**Figura 9.** Evapotranspiração diária (ET) de referência e da cultura durante o ciclo do algodoeiro, área B, cultivar TMG 43 WS.



**Figura 10.** Evapotranspiração diária (ET) de referência e da cultura durante o ciclo do algodoeiro, área C, cultivar FM 940 GLT.



**Figura 11.** Evapotranspiração diária (ET) de referência e da cultura durante o ciclo do algodoeiro, área D, cultivar FM 940 GLT.

A ETr está diretamente relacionada à capacidade da vegetação de retirar a água por meio das raízes e perdê-la para a atmosfera por transpiração (Lins et al., 2017). Na fase I (semeadura até 10% de cobertura de solo), correspondente a imagem de 03 de fevereiro, a perda de água pela superfície é prioritariamente proveniente da evaporação do solo. Para esta data, os maiores valores de ETr foram obtidos nas áreas A (2,81 mm dia<sup>-1</sup>) e B (3,01 mm dia<sup>-1</sup>) (Tabela 5). Enquanto nas áreas cultivadas com FM 940 GLT, a maior parte da radiação solar incidente, no momento da

passagem do satélite, foi direcionada para o aquecimento do ar na forma de calor sensível, conforme análise do particionamento dos fluxos de energia (Figura 13).



Figura 13. Particionamento dos fluxos de energia, valores médios de fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e calor no solo (G) em 03/02/2015 (a), 26/05/2015
(b) e 14/08/2015 (c) na cultura do algodão, cultivares TM 43 WS e FM 940 GLT, Fazenda Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.

Alguns fatores podem ter interferido nas diferenças na ETr entre as áreas, à exemplo, a maior interceptação da radiação solar na cultivar FM 940 GLT, uma vez que essas áreas apresentavam IAF superior às demais (Tabela 5). E ainda, a remoção da palhada sobre a linha de semeadura, mesmo com o preparo reduzido do solo, visto que a palhada proveniente da safra anterior contribui com a redução da evaporação do solo (Dalmago e Bergamaschi, 2017; Gava et al., 2013). Assim, as áreas A e B podem ter apresentado maior ETr devido ao aumento da área de solo exposto com o revolvimento recente do solo causado pela semeadora.

A imagem do mês de maio apresentou os maiores valores de ETr estimados,

com médias de 3,23 a 3,34 mm dia<sup>-1</sup>. Os valores reportados nas pesquisas de estimativas com o SEBAL para a cultura do algodão apresentam particularidades conforme a região de estudo, devido à sensibilidade do modelo às condições micrometeorológicas predominantes. Em áreas irrigadas de clima semiárido, a ETr do algodoeiro em pleno desenvolvimento foi superior a 6,0 mm dia<sup>-1</sup> de acordo com Bezerra MVC et al. (2012); 5,2 mm dia<sup>-1</sup>, segundo Bezerra et al. (2014) e 6 mm dia<sup>-1</sup>, conforme Borges et al. (2010). Enquanto, em cultivos de algodão de sequeiro no Estado de Mato Grosso, José et al. (2019) encontraram ETr de ~7,5 mm dia<sup>-1</sup> aos 150 dias após a semeadura das cultivares FM 975 WS, FM 940 GLT e TMG 46 B2RF.

A demanda atmosférica nessa data, representada pela ETOFAO, foi de 3,71 mm dia-1, o que contribuiu para os valores abaixo dos reportados na literatura. O comportamento da ETOFAO reflete na evapotranspiração real da cultura, uma vez que a perda de água pela superfície é ordenada pela demanda atmosférica representada evapotranspiração de referência. Tal fato se deve as condicões pela micrometeorológicas amenas das variáveis que influenciam o cálculo da ETo nessa data como temperatura do ar (23,89 °C), umidade relativa do ar (80%) e velocidade do vento (1,03 m s<sup>-1</sup>).

No final do ciclo a ETr média foi de 2,0 mm dia<sup>-1</sup> nas áreas A e B, e de 1,72 mm dia<sup>-1</sup> nas áreas C e D (Tabela 5), resultados similares aos reportados por Bezerra MVC et al. (2012) no estágio final de maturação do algodão (2,0 mm dia<sup>-1</sup>). Como já mencionado, as diferenças nas datas de aplicação do desfolhante podem ter contribuído para os menores valores de ETr nas áreas C e D, em consequência do menor IAF, visto que houve forte correlação entre essas variáveis (R= 0,78, p≤0,001, cultivar FM940 GLT) (Tabela 6). A evolução temporal da ETr ao longo do ciclo é coerente com os resultados reportados por Monteiro et al. (2014) na cultura da soja, com redução da ETr no estágio de maturação na ordem de 50%, em relação aos valores estimados para a fase de pleno desenvolvimento das plantas.

As estimativas da ETr obtidas com o SEBAL, por meio de imagens de satélite Landsat 8, diferiram das encontradas pelo método padrão da FAO e, de modo geral, houve divergência nos valores diários independentemente da data, cultivar e área de estudo (Tabela 7). **Tabela 7.** Erro médio absoluto (**EMA**), erro relativo médio (**ERM**), raiz quadrada do erro quadrático médio (**RMSE**) e índice de ajustamento de Willmott (**d**) para a evapotranspiração real diária do algodoeiro, cultivares TMG 43 WS (áreas A e B) e FM 940 GLT (áreas C e D), estimada pelo algoritmo SEBAL (**ETr**<sub>Sebal</sub>, **mm dia**<sup>-1</sup>) em relação ao método padrão Penman-Monteith FAO-56 (**ETr**<sub>Fao</sub>, **mm dia**<sup>-1</sup>), Fazenda Paiaguás, Diamantino - MT, 2015.

			A		В		С		D	
Data	Fase	ETr <sub>Fao</sub>	DAS	ETr <sub>Sebal</sub>	DAS	ETr <sub>Sebal</sub>	DAS	ETr <sub>Sebal</sub>	DAS	ETr <sub>Sebal</sub>
03/fev	I	2,11	3	2,81	7	3,01	14	1,41	18	2,05
26/mai	III	4,27	115	3,34	119	3,31	126	3,25	130	3,23
14/ago	IV	4,10	195	1,93	199	2,08	206	1,78	210	1,67
EMA			1,28				1,30			
ERM			36,96					35	,13	
RMSE			1,41				1,53			
d				0,	89			0,8	88	

DAS: Dias após semeadura.

Fase I: Semeadura até 10% de cobertura de solo; Fase III: Início da floração ao início da maturação; Fase IV: Início ao final da maturação (Allen et al.,1998).

O erro quadrático médio (RMSE), para as cultivares TMG 43 WS e FM 940 GLT foram, respectivamente, 1,41 e 1,53 mm dia<sup>-1</sup>, com maior erro relativo médio (ERM), 36,96%, na cultivar TMG 43 WS. O desempenho do SEBAL, com base na distância entre os valores estimados pelo algoritmo e os calculados pelo padrão FAO, representado pelo índice de ajustamento "d" de Willmott, demonstram que as estimativas com o SEBAL estiveram mais próximas das médias obtidas pelo padrão FAO nas áreas cultivadas com TMG 43 WS, com "d" igual a 0,89.

A literatura demonstra que o modelo tem apresentado boa concordância, quanto à precisão, nas estimativas de ETr em comparação a metodologia padrão da FAO. Entretanto, é interessante ressaltar que muitas publicações relacionadas às estimativas da evapotranspiração das culturas, com o uso do SEBAL, foram realizadas em áreas de clima distinto ao da presente pesquisa. Silva et al. (2018) relataram erro máximo de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> para o município de Salto do Lontra -PR, com ERM em áreas de soja entre 4,89 e 19,66%, já para áreas de pastagens os ERM mínimo e máximo foram de 16,5 e 37,03%, respectivamente.

Bezerra et al. (2014), com imagens de Landsat 5 na região semiárida do Nordeste, encontraram ERM nas magnitudes de 7,1 a 34,0% na cultura da soja. Os

autores atribuiriam o maior ERM à variação da umidade relativa do ar, devido a precipitação ocorrida no dia anterior à passagem do satélite, o que indica a necessidade de condições atmosféricas estáveis para estimativas com maior precisão. Também em clima semiárido, na cultura do trigo no Egito, Elnmer et al. (2019) encontraram boa concordância nas estimativas com o SEBAL em relação ao padrão FAO, com RMSE de 0,46 mm dia<sup>-1</sup>.

Em áreas de Cerrado nos Estados de São Paulo e Minas Gerais, a partir de imagens MODIS, o SEBAL superestimou a ETr em locais com cana de açúcar (0,8 mm dia<sup>-1</sup>) e pastagem (1,15 mm dia<sup>-1</sup>), refletindo, conforme os autores, as superestimativas da fração evaporativa e do saldo de radiação diária (Ruhoff et al., 2012). José et al. (2019) obtiveram valores de 1,06 a 1,26 mm dia<sup>-1</sup>, para RMSE, em três cultivares de algodão por meio do Landsat 8, os autores ressaltam que as divergências observadas são resultantes da variabilidade espaço-temporal da ET que é considerada no algoritmo SEBAL ao contrário da estimativa padrão FAO.

Os modelos que estimam a ETr a partir do balanço de energia, incluindo o SEBAL, foram originalmente desenvolvidos para climas semiáridos onde o contraste é maior entre a temperatura da superfície, a umidade, a vegetação e a evapotranspiração, exigindo desses modelos calibrações para uso em áreas úmidas (Bhattarai et al., 2016).

Em clima subtropical úmido no sudoeste dos EUA, as estimativas da ETr com modelos que requerem a escolha de pixels ancoras, SEBAL e METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*), tiveram desempenho razoavelmente bom, devido às limitações que podem ocorrer nas suposições de ambos os pixels – quanto à ausência de ET no pixel quente e de calor sensível no pixel frio (Bhattarai et al., 2016). A subjetividade por trás das escolhas desses pixels é difícil de ser evitada e, muitas incertezas geradas pelo algoritmo refletem na estimativa do calor sensível (considerado o cerne do SEBAL), resultando em erros no particionamento de energia e, consequentemente, no fluxo de calor latente (Ruhoff et al., 2012).

O padrão sazonal dos fluxos de energia nas áreas analisadas estão demonstrados na Figura 13. Os percentuais de Rn convertidos em LE, na fase inicial de desenvolvimento (03/fevereiro), foram em média de 51,74% do Rn<sub>inst</sub> para a cultivar TMG 43 WS, e de 31,63% para a cultivar FM 940 GLT. Ao final do ciclo a razão

Rn<sub>inst</sub>/LE esteve entre 32,56% (área D) e 40,33% (área B). Foram observados elevados índices de calor sensível (H) nestas fases, em comparação à imagem de 26/maio, em consequência do maior IAF no período de floração e frutificação, quando mais de 83% do Rn<sub>inst</sub> foi convertido em calor latente. Concordando com os resultados de Bezerra BG et al. (2012), no semiárido do Rio Grande do Norte, e Bastiaanssen (2000) na Turquia, que encontraram, em áreas de algodoeiro irrigado, valores acima de 80% do saldo de radiação líquida destinados para a evaporação da água.

A evaporação da água no solo e a transpiração pelas plantas ocorrem de forma simultânea variando ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas; inicialmente as maiores perdas são decorrentes da evaporação do solo; com o desenvolvimento da vegetação e aumento do dossel a transpiração se torna o principal processo (Allen et al., 1998). De acordo com as estimativas obtidas com o SEBAL, o coeficiente de cultivo (Kc) e a evapotranspiração real foram menores nas fases inicial e final, enquanto na fase III (início da floração ao início da maturação), esses parâmetros atingiram valores máximos (Tabela 8).

**Tabela 8.** Erro médio absoluto (**EMA**), erro relativo médio (**ERM**), raiz quadrada do erro quadrático médio (**RMSE**) e índice de ajustamento de Willmott (**d**) para o coeficiente de cultivo do algodoeiro, cultivares TMG 43 WS (áreas A e B) e FM 940 GLT (áreas C e D), estimados pelo algoritmo SEBAL (**Kc**<sub>Sebal</sub>) em relação aos valores tabelados pela FAO-56 (**Kc**<sub>Fao</sub>), Fazenda Paiaguás, Diamantino - MT, 2015.

			Α		В		С			D	
Data	Fase	KcFao	DAS	KcSebal	DAS	KcSebal	DAS	<b>Kc</b> Sebal	DAS	<b>Kc</b> Sebal	
03/fev	I	0,45	3	0,60	7	0,64	14	0,30	18	0,44	
26/mai		1,15	115	0,90	119	0,89	126	0,88	130	0,87	
14/ago	IV	0,75	195	0,35	199	0,38	206	0,33	210	0,31	
EMA				0,27			0,27				
ERM				36,96			35,13				
RMSE			0,28				0,31				
d				0,89			0,88				

DAS: Dias após semeadura.

Fase I: Semeadura até 10% de cobertura de solo; Fase III: Início da floração ao início da maturação; Fase IV: Início ao final da maturação (Allen et al.,1998).

Observa-se que os valores do Kc do algodoeiro estimados neste estudo

diferem daqueles sugeridos pela FAO. O Kc obtido na área D, na fase I, foi o que mais se aproximou do Kc FAO. Na fase de desenvolvimento inicial, nas áreas A e B, o Kc foi cerca de 44% maior que o valor da FAO para esse estágio. Nas demais fases, as estimativas foram inferiores em todas as áreas, em média 23% na fase III, e 54% na fase IV. Valores inferiores aos tabelados pela FAO, na fase de desenvolvimento inicial, também foram reportados por José et al. (2019), para as cultivares FM 940 GLT e TMG 43 B2RF, entretanto, na fase de máximo IAF da cultura os Kcs estimados apresentaram boa concordância com os valores sugeridos pela FAO, entre 1,09 e 1,12.

A eficiência do uso da água (EUA) pelas cultivares analisadas são demonstradas na Tabela 9. Os valores de EUA para a cultivar TMG 43 WS foram de 0,38 e 0,41 kg m<sup>-3</sup> (algodão em caroço), e de 0,35 e 0,36 kg m<sup>-3</sup> (algodão em pluma), Para a cultivar FM 940 GLT a EUA foi 0,41 e 0,48 kg m<sup>-3</sup>, para algodão em caroço, e de 0,34 e 0,37 kg m<sup>-3</sup> para o algodão em pluma. Os valores obtidos de EUA para o algodão em pluma assemelham-se aos obtidos por José et al. (2019), para três cultivares de algodão, entre 0,36 e 0,40 kg m<sup>-3</sup>, entretanto, para o algodão em caroço, os autores relataram entre 0,93 e 0,99 kg m<sup>-3</sup>, resultados acima dos reportados pela FAO (0,4–0,6 kg m<sup>-3</sup>), devido à alta produtividade da cultura na área do estudo.

Tabela 9. Produtividade em caroço e pluma de algodão (Kg ha <sup>-1</sup> ) das cultivares TMG
43 WS e FM 940 GLT, e eficiência do uso da água (kg m-3) pela cultura, Fazenda
Paiaguás, Diamantino-MT, 2015.

Área	Cultivar	Produti	vidade	Eficiência do uso da água		
	Cultival -	Caroço	Pluma	Caroço	Pluma	
Α		2.224,77	1.961,09	0,41	0,36	
В	11010 43 003	2.099,34	1.959,91	0,38	0,35	
С		2.243,91	1.704,52	0,48	0,37	
D	FIVI 940 GLT	2.018,00	1.686,50	0,41	0,34	

A eficiência do uso da água pelas culturas deve ser interpretada levando em consideração a influência de diversos fatores, como a produtividade, a evapotranspiração real, como também as práticas de manejo adotadas, solo, água e fertilidade. As diferenças nas estimativas da EUA pelas culturas podem ser atribuídas às particularidades do ambiente de condução dos estudos, dentre as quais se incluem

as condições climáticas distintas, o sistema de irrigação e as práticas de manejo adotadas (Fan et al., 2018).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimativas dos parâmetros biofísicos pelo algoritmo SEBAL foram condizentes com a literatura. O NDVI e o IAF foram bons indicadores do desenvolvimento do algodoeiro. A variabilidade dos parâmetros biofísicos e do saldo de radiação apresentaram variações compatíveis com a cobertura vegetal.

Em maio houve predomínio de fluxo de calor latente no particionamento dos fluxos de energia, enquanto nas fases inicial e final do ciclo ocorrem aumento de fluxo de calor sensível.

A ET real estimada foi maior na data com maior índice de área foliar em ambas as cultivares e menor nas fases de desenvolvimento inicial e final do ciclo da cultura. As estimativas de ET real com SEBAL diferenciaram da ET real calculada pelo padrão FAO.

As informações geradas pelo SEBAL podem auxiliar na compreensão das dinâmicas ocorridas nas áreas agrícolas de cultivo de algodão no Cerrado. Portanto, é imprescindível a continuidade de estudos sobre a ET real e balanço de energia por modelagem em escala regional. Melhores resultados podem ser obtidos com calibrações locais ou regionais.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Alam, M. S., Lamb, D. W., Rahman, M. M., Bradbury, R., Mccarthy, C., 2017. Determining pasture evapotranspiration using active optical sensor derived normalized difference vegetation index. **Precision Agriculture Association New Zealand.** 1st Asian-Australasian Conference on Precision Patures and Livestock Farming, Hamilton, New Zealand, 16th - 18th October.

Allen, R. G., 2012. RefET. Reference Evapotranspiration Calculator. University of Idaho.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome, 297.

Allen, R. G., Trezza, R., Tasumi, M., 2002. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and users manual, version 1.0. p. 98, Idaho.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, L. M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. 22, 711– 728.

Alves, L. E. R., Gomes, H. B., Santos, M. N., Freitas, I. G. F., 2017. Balanço de radiação através do satélite Landsat-8 na bacia do Rio Pajeú. **Revista do Departamento de Geografia**. 33, 117-127.

Bastiaanssen, W. G. M, Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P. Allen, R. G., 2005. SEBAL Model with remotely sensed data to improve waterresources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 131, 2.

Bastiaanssen, W. G. M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Biblioteheek, Den Haag, the Netherlands. 272.

Bastiaanssen, W. G. M., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**. 229, 87-100.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Política Agrícola, Portaria nº 205, de 22 de agosto de 2018. Resolve aprovar o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de algodão herbáceo no Estado de Mato Grosso, ano-safra 2018/2019. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2018.

Bezerra, A. R. G., Silva, M. A. V., Matos, R. E., Pinheiro, A. C. T., Moscon, E. S., 2014. Componentes do balanço de energia da soja estimada por meio de imagens via satélite. **Revista Agro@mbiente**. 8, 59-65.

Bezerra, B. G., Silva, B. B., Bezerra, J. R. C., Sofiatti, V., Santos, C. A. C., 2012. Evapotranspiration and crop coefficient for sprinkler-irrigated cotton crop in Apodi Plateau semiarid lands of Brazil. **Agricultural Water Management**. 107, 86-93.

Bezerra, M. V. C., Silva, B. B., Bezerra, B. G., Borges, V. P., Oliveira, A. S., 2012. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro irrigado a partir de imagens de sensores orbitais. **Revista Ciência Agronômica**. 43, 64-71.

Bhattarai, N., Shaw, S. B., Quackenbush, L. J., Im, J., Niraula, R., 2016. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 49, 75-86.

Biudes, M. S., Vourlitis, G. L., Machado, N. G., Arruda, P. H. Z., Neves, G. A. R., Lobo, F. A., Neale, C. M. U., Nogueira, J. S., 2015. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**. 202, 112-124.

Borella, D. R., Siqueira, F. R. P. S., Faria, T. O., Biudes, M. S., Machado, N. G., 2018. Efeito da conversão da vegetação nativa em áreas agrícolas sobre variáveis biofísicas na região de transição Cerrado-Amazônia. **Ciência e Natura**. 40, 1-12. Borges, V. P., Oliveira, A. S., Silva, B. B., 2010. Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação liquida em área de algodoeiro irrigado. **Ciênc. Agrotec., Lavras**. 34, 485-493.

Brutsaert, W., 1982. Evaporation into the atmosphere. D. Reidel Publishing Co. Dordrecht, Holland. 300.

Buriol, G. A., Estefanel, V., Heldwein, A. B., Prestes, S. D., Horn, J. F. C., 2012.
Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria
– RS. Ciência Rural. 42, 1563-1567.

Cammalleri, C., Anderson, M. C., Gao, F., Hain, C. R., Kustas, W. P., 2014. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion. **Agricultural and Forest Meteorology**. 186, 1-11.

Carvalho, D. F., Rocha, H. S., Bonomo, R., Souza, A. P., 2015. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesq. agropec. bras**. 50, 1-11.

Chiavegato, E. J., Salvatierra, D. K., Gottardo, L. C. B., 2009. **Algodão**. In: Monteiro, José Eduardo B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 530.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento., 2019. Monitoramento agrícola, Boletim de Monitoramento Inverno Setembro/2019. https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/graos/monitoramento-agricola.

Dalmago, G. A., Bergamaschi, H., 2017. Evaporation of the soil water in response to the amount of straw and evaporative demand. **Agrometeoros**. 25, 361-371.

Dantas, M. J. F., Arraes, F. D. D., Santos, J. B., Zimback, C. R. L., 2015. Sensoriamento remoto na determinação da evapotranspiração na bacia do riacho Jardim/CE. **Energ. Agric.** 30, 383–394.

Demarchi, J. C., Piroli, E. L., Zimback, Lopes, C. R., 2011. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz Do Rio Pardo – SP usando imagens landsat-5. **Ra´e Ga**: **O espaço geográfico em análise**. 21, 234-271.

Doorenbos, J., Kassam, A. H., 1994. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (FAO. Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33). Tradução de H. R. Gheyi; A. A. de Sousa; F. A. V. Damasceno; J. F. de Medeiros.

Doorenbos, J., Pruitt, W. O., 1975. **Crop water requirement's:** Revised, Roma: FAO, 144 p. Irrigation and Drainage Paper, 24.

Echer, F. R., Bogiani, J. C., Rosolem, C. A., 2014. (IMAMT). Considerações técnicas sobre o manejo de regulador de crescimento no algodoeiro. **Instituto Mato**grossense do Algodão (IMAMT). Primavera do Leste, MT, 1-8. Disponível em: <a href="http://www.imamt.com.br/system/anexos/arquivos/208/original/circular\_tecnica\_edicao7\_baixa\_ok\_final\_(1).pdf?1390499845> Acesso em: 01 fev. 2019.">http://www.imamt.com.br/system/anexos/arquivos/208/original/circular\_tecnica\_edicao7\_baixa\_ok\_final\_(1).pdf?1390499845> Acesso em: 01 fev. 2019.</a>

Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S., Tawfik, A., 2019. Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. **Agricultural Water Management**. 213, 682-692.

Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Oliveira, A. P., Soares, J., 2008. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**. 86, 299-309.

Fan, Y., Wang, C., Nan, Z., 2018. Determining water use efficiency of wheat and cotton: A meta-regression analysis. **Agricultural Water Management**. 199, 48–60.

Fausto, M. A., Angelini, L. P., Marques, H. O., Silva Filho, A., Machado, N. G., Biudes,
M. S., 2016. Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato Grosso. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal Of Applied
Science. 11, 350-361.

Frey, C. M., Rigo, G., Parlow, E., 2007. Urban radiation balance of two coastal cities in a hot and dry environment. **International Journal of Remote Sensing**. 28, 2695-2712.

Furlanetto, R. H, Silva, C., 2017. Monitoramento remoto de plantas submetidas à condição de seca. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**. 6325, 115-126.

Garrison, J. D., Adler, G. P., 1990. Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. **Solar Energy**. 44, 225-241.

Gava, R., Freitas, P. S. L., Faria, R. T., Rezende, R., Frizzone, J. A., 2013. Soil water evaporation under densities of coverage with vegetable residue. **Eng. Agríc**. 33, 89-98.

Gomes, H. B., Cavalcante, L. B., Silva Junior, R. S., Santos, M. N., 2017. Surface temperature and albedo in the Ilha Solteira region, São Paulo. **Mercator**. 16, 1-16.

Gomes, L. C. F., Santos, C. A. C., Almeida, H. A., 2013. Balanço de energia à superfície para a cidade de Patos-PB usando técnicas de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 6, 15-28.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE., 2016. Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes. Prod. agric. munic., Rio de Janeiro, 43. José, J. V., Oliveira, N. P. R., Silva, T. J. A., Silva, E. M. B., Costa, J. O., Fenner, W., Coelho, R. D., 2019. Quantification of cotton water consumption by remote sensing. **Geocarto International**. 1-15.

Kamali, M. I., Nazari, R., 2018. Rouzbeh NazariDetermination of maize water requirement using remote sensing data and SEBAL Algorithm. Agricultural Water Management. 209, 197-205.

Leitão, M. M. V. B. R., Oliveira, G. M., 2000. Influência da irrigação sobre o albedo. **Rev. bras. eng. agríc. ambient**. 4, 2000.

Leite, M. R., Brito, J. L. S., 2013. Avaliação de desempenho do algoritmo SEBAL na modelagem térmica da bacia do rio vieira no norte de minas gerais. **Revista Brasileira de Cartografia**: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. 1, 161-174.

Lins, F. A. C., Araújo, D. C. S., Lopes, J. L. B. S., Lopes, P. M. O., Oliveira, J. D. A., Silva, A. T. C. S. G., 2017. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido Pernambucano utilizando sensoriamento remoto. **Irriga, Botucatu,** Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI. 64-75.

Machado, C. R., Silva, B. B., Albuquerque, M. B., Galvíncio, J. D., Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM - Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 29, 55-67.

Martins, A. L., Cunha, C. R., Pereira, V. M. R., Danelichen, V. H. M., Machado, N. G., Lobo, F. A., Musis, C. R., Biudes, M. S., 2015. Mudanças em índices biofísicos devido à alteração da cobertura do solo em área nativa de Cerrado em Mato Grosso. **Ciência e Natura**. 37, 152-159.

Matos, R. C. M., Candeias, A. L. B., Azevedo, J. R. G., Hattermann, F. F., Koch, H., Kleinschmit, B., 2015. Análise multitemporal do albedo, NDVI e temperatura no entorno do reservatório de Itapiraca – PE: anos de 1985 e 2010. **Revista Brasileira** 

**de Cartografia**: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. 67, 545-554.

Monteiro, P. F. C., Fontana, D. C., Santos, T. V., Roberti, D. R., 2014. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração para áreas de cultivo de soja no sul do Brasil utilizando imagens do sensor TM Landsat 5. **Bragantia**. 73, 72-80.

Motomiya, A. V. A., Molin, J. P., Motomiya, W. R., Baio, F. H. R., 2012. Mapeamento do índice de vegetação da diferença normalizada em lavoura de algodão. **Pesq. Agropec. Trop**. 2, 112-118.

National Aeronautics And Space Administration (NASA), 2014. Landsat Data Continuity Mission: Continuously Observing Your World. 2014. Disponível em: <a href="http://ldcm.gsfc.nasa.gov/mission\_details.html">http://ldcm.gsfc.nasa.gov/mission\_details.html</a>. Acesso em: 05 março de 2018.

Oliveira, L. M. M., Montenegro, S. M. G. L., Silva, B. B., Antonino, A. C. D., Moura, A. E. S. S., 2014. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.18, 1039-1046.

Pavão, V. M., Querino, C. A. S., Beneditti, C. A., Pavão, L. L., Querino, J. K. A. S., Machado, N. G., Biudes, M. S., 2015. Temperatura e albedo da superfície por imagens TM Landsat 5 em diferentes usos do solo no sudoeste da Amazônia brasileira (nota de pesquisa). **Revista Brasileira de Climatologia.** 16, 169–183.

R Core Team., 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2018. Disponivel em:< https://www.R-project.org/>.

Rolim, G. S., Sentelhas, P. C., Barbieri, V., 1998. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. 6, 133-137.

Ruhoff, A. L., Paz, A. R., Collischonn, W., Aragão, L. E. O. C., Rocha, H., Malhi, Y. S., 2012. A MODIS-Based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savanas. **Remote Sens**. 4, 703-725.

Santos, C. A. G., Silva, R. M., Silva, A. M., Brasil Neto, R. M., 2017. Estimation of evapotranspiration for different land covers in a Brazilian semi-arid region: A case study of the Brígida River basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. 74, 54-66.

Santos, E. G., Inoue, M. I., Mendes, K. F., Ben, R., Cavalcante, N. R., Oliveira, J. S., 2014. Eficiência do saflufenacil aplicado como desfolhante em pré-colheita no algodoeiro. Revista de Ciências Agrarias - Amazon Journal Of Agricultural And Environmental Sciences. 57, 124-129.

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J. B., Cunha, T. J. F., 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: EMBRAPA.

Santos, W. O., Sobrinho, J. E., Medeiros, J. F., Moura, M. S. B., Nunes, R. L. C., 2014. Coeficientes de cultivo e necessidades hídricas da cultura do milho verde nas condições do semiárido brasileiro. **Irriga, Botucatu**. 19, 559-572.

Silva, A. M., Silva, R. M., Silva, B. B., 2015. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. **Revista Brasileira de Cartografia**. 67, 1203-1216.

Silva, B. B., Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M., Montenegro, S. M. G. L., Barbosa Junior, B., 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 20, 3-8.

Silva, B. B., Mercante, E., Vilas Boas, M. A., Wrublack, S. C., Oldni, L. V., 2018. Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. **Rev. Ciênc. Agron.** 49, 221-227.

Silva, I. P. F., Junior, J. F. S., Araldi, R., Tanaka, A. A., Girotto, M., Bosquê, G. G.,
Lima, F. C. C., 2011. Estudo das fases fenológicas do algodão (*Gossypium hirsutum*L.). Revista Científica Eletrônica de Agronomia. 10, 1-10.

Silva, L. C., Milton, C., Costa, C., Biudes, M. S., 2015. Estimativa do balanço de radiação por sensoriamento remoto de diferentes usos de solo no sudoeste da Amazônia brasileira. **Sociedade & Natureza**. 27, 341-356.

Silva, R. M., Montenegro, S. M. G. L., Santos, C. A. G., 2012. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment. **Natural Hazards**. 62, 953-970.

Silva, R. M., Santos, C. A. G., Silva, V. C. L., Silva, L. P., 2013. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**. 185, 8977–8990.

Souza, A. P., Zamadei, T., Monteiro, E. B., Casavecchia, B. H., 2016. Transmissividade Atmosférica da Radiação Global na Região Amazônica de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 31, 639-648.

Souza, A. P., Mota, L. L., Zamadei, T., Martim, C. C., Almeida, F. T., Paulino, J., 2013. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de mato Grosso. **Nativa**. 1, 34-43. Souza, P. J. O. P., Ribeiro, A., Rocha, E. J. P., Loureiro, R. S., Bispo, C. J. C., Sousa, A. M. L., 2010. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 14, 65-73.

Tang, R., Li, Z., Chen, K., Jia, Y., Li, C., Sun, X., 2013., 2013. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. **Agricultural and Forest Meteorology**. 174-175, 28-42.

Thompson, D., Barbosa, I., Oliveira, R. A. A. C., 2017. Avaliação da variação do albedo de superfície por tipologias de uso e cobertura terrestre. **Revista Brasileira de Cartografia**. 69, 375-387.

Thornthwaite, C. W., Mather, J. R., 1955. The water balance: publications in climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104.

Wilmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D.R., O'donnell, J., Rowe, C. M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research. 90, 8995-9005.

Zonta, J. H., Bezerra, J. R. C., Pereira, J. R., Sofiatti, V., 2016. Manejo da irrigação do algodoeiro. Campina Grande, PB: Circular Técnica; 139.

## ANEXOS

Anexo - A

**Tabela 1.** Coeficientes dos pesos ( $\omega\lambda$ ) para o cálculo do albedo planetário através de imagens Landsat 8.

Pesos	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	
ωλ	0,300	0,277	0,233	0,143	0,035	0,12	
Easter Silva et al. (2016)							

Fonte: Silva et al. (2016).

Anexo - B

**Tabela 2.** Fator multiplicativo (M<sub>L</sub>) e aditivo (AL) para reflectância e radiância espectral e irradiâncias espectrais exoatmosféricas solares (ESOL) das imagens de Landsat 8 estudadas.

Dete	Dondoo	AL	M∟	ESOL
Data	Danuas	W m <sup>-2</sup>	(Wm <sup>-2</sup> µm <sup>-1</sup> )	
	2	-66,17750	1,3236 x10 <sup>-2</sup>	2079,19
	3	-60,98200	1,2196x10 <sup>-2</sup>	1915,68
	4	-51,42346	1,028x10 <sup>-2</sup>	1615,63
03/02/2015	5	-31,46859	6,294 x10 <sup>-3</sup>	988,61
	6	-7,82595	1,565x10 <sup>-3</sup>	245,86
	7	-2,63777	5,28 x10 <sup>-4</sup>	82,87
	10	0,1	3,34x10 <sup>-4</sup>	-
	2	-62,64529	1,2529 x10 <sup>-2</sup>	1968,04
	3	-57,72710	1,1545 x10 <sup>-2</sup>	1813,39
	4	-48,67874	9,7357 x10 <sup>-3</sup>	1529,27
26/05/2015	5	-29,78896	5,9578 x10 <sup>-3</sup>	935,85
	6	-7,40824	1,4816 x10 <sup>-3</sup>	232,73
	7	-2,49697	4,994 x10 <sup>-4</sup>	78,44
	10	0,1	3,34x10 <sup>-4</sup>	-
	2	-62,64274	1,2529 x10 <sup>-2</sup>	1968,14
	3	-57,72475	1,1545 x10 <sup>-2</sup>	1813,49
	4	-48,67676	9,7354 x10⁻³	1529,24
14/08/2015	5	-29,78775	5,9575 x10⁻³	935,80
	6	-7,40794	1,4816 x10⁻³	232,73
	7	-2,49687	4,994 x10 <sup>-4</sup>	78,44
	10	0,1	3,34x10 <sup>-4</sup>	-